



UNIVERSIDAD TÉCNICA PARTICULAR DE LOJA

La Universidad Católica de Loja

ÁREA TÉCNICA

TÍTULO DE INGENIERO EN GEOLOGÍA Y MINAS

Aplicación de métodos geofísicos (ERT y MICROGRAVIMETRÍA) para determinar la geometría de los movimientos de ladera en Loja.

TRABAJO DE TITULACIÓN.

AUTORA: Gómez Uchuari, Silvia Johanna

DIRECTOR: Soto Luzuriaga, John Egverto, M.Sc.

CODIRECTOR: Tamay Granda, José Vidal, M.Sc.

LOJA – ECUADOR

2017



Esta versión digital, ha sido acreditada bajo la licencia Creative Commons 4.0, CC BY-NY-SA: Reconocimiento-No comercial-Compartir igual; la cual permite copiar, distribuir y comunicar públicamente la obra, mientras se reconozca la autoría original, no se utilice con fines comerciales y se permiten obras derivadas, siempre que mantenga la misma licencia al ser divulgada. <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/deed.es>

Septiembre, 2017

APROBACIÓN DEL DIRECTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

M.Sc.

John Egverto Soto Luzuriaga

DOCENTE DE LA TITULACIÓN

De mi consideración:

El presente trabajo de titulación: **Aplicación de métodos geofísicos (ERT y MICROGRAVIMETRÍA) para determinar la geometría de los movimientos de ladera en Loja** realizado por **Silvia Johanna Gómez Uchuari**, ha sido orientado y revisado durante su ejecución, por cuanto se aprueba la presentación del mismo.

Loja, Enero 2017

f) _____

M.Sc. John Egverto Soto Luzuriaga.

DECLARACIÓN DE AUTORÍA Y CESIÓN DE DERECHOS

“Yo, **Silvia Johanna Gómez Uchuari** declaro ser autora del presente trabajo de titulación: Aplicación de métodos geofísicos (ERT y MICROGRAVIMETRÍA) para determinar la geometría de los movimientos de ladera en Loja, de la titulación de Geología y Minas, siendo Mgtr. John Egverto Soto Luzuriaga director del presente trabajo; y eximo expresarme a la Universidad Técnica Particular de Loja y a sus representantes legales de posibles reclamos o acciones legales. Además certifico que las ideas, conceptos procedimientos y resultados vertidos en el presente trabajo investigativo, son de mi exclusiva responsabilidad.

Adicionalmente declaro conocer y aceptar la disposición del Art. 88 del Estatuto Orgánico de la Universidad Técnica Particular de Loja que en su parte pertinente textualmente dice: “Forman parte del patrimonio de la Universidad la propiedad intelectual de investigación, trabajos científicos o técnicos y tesis de grado que se realicen a través, o con apoyo financiero, académico o institucional (operativo) de la Universidad”.

f) _____

Silvia Johanna Gómez Uchuari.
1105865503

DEDICATORIA

A mi madre Alba

*Por su incondicional apoyo en todos los
momentos de mi vida...*

Con amor, Johanna

AGRADECIMIENTO

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento a mi madre por ser mi fortaleza para seguir adelante.

A mi director de tesis Msc. Jhon Soto por toda su ayuda, paciencia y conocimientos brindados, que han sido muy valiosos para la realización de este proyecto.

Agradezco la colaboración brindada por Msc. José Vidal Tamay, Ing. Yan Jumbo, Msc, Belizario Zarate, Ing. Juan Carlos Quintuña, por todos los conocimientos que me han aportado y por todo su tiempo dedicado.

A mis amigas May, Day, Gaby, y amigo Cris por todos los momentos de locura, amistad, felicidad y ayuda desinteresada.

Mi especial consideración para ellos y todos aquellos que de diferentes formas colaboraron en la culminación del presente trabajo.

INDICE DE CONTENIDOS

| | |
|--|------|
| APROBACION DEL DIRECTOR DEL TRABAJO DE FIN DE TITULACIÓN | ii |
| DECLARACIÓN DE AUTORÍA Y CESIÓN DE DERECHOS..... | iii |
| DEDICATORIA | iv |
| AGRADECIMIENTO | v |
| INDICE DE CONTENIDOS | vi |
| INDICE DE FIGURAS..... | viii |
| INDICE DE TABLAS | ix |
| RESUMEN..... | 1 |
| ABSTRACT | 2 |
| INTRODUCCIÓN..... | 3 |
| ANTECEDENTES..... | 4 |
| OBJETIVOS | 5 |
| CAPÍTULO I:GENERALIDADES..... | 6 |
| 1.1 Ubicación geográfica y acceso | 7 |
| 1.2 Clima | 8 |
| 1.3 Geomorfología..... | 8 |
| 1.4 Relieve e Hidrografía | 8 |
| 1.5 Geología regional | 10 |
| 1.6 Marco Geotectónico..... | 12 |
| CAPITULO II:MARCO CONCEPTUAL..... | 14 |
| 2.1 Movimientos de ladera..... | 15 |
| 2.1.1 Mecanismos de Falla..... | 15 |
| 2.1.2 Clasificación de los deslizamientos..... | 15 |
| 2.2 Tomografía de Resistividad Eléctrica..... | 17 |
| 2.2.1 Definición..... | 17 |
| 2.2.2 Arreglos geométricos de los electrodos. | 17 |
| 2.2.3 Relación de la geología y resistividad | 18 |
| 2.3 Microgravimetría..... | 19 |
| 2.3.1 Conceptos Fundamentales..... | 19 |
| 2.3.2 Ley de la Gravitación Universal. | 20 |
| 2.3.3 Mediciones de la Gravedad. | 20 |
| 2.3.4 Anomalía de Bouguer..... | 21 |
| 2.3.5 Densidad de las rocas. | 22 |

| | |
|--|----|
| CAPÍTULO III:METODOLOGIA DE TRABAJO | 23 |
| 3.1 Documentación y validación de la información existente | 24 |
| 3.2 Trabajo de campo..... | 24 |
| 3.2.1 Ensayos Geofísicos..... | 24 |
| 3.2.2 Geología..... | 31 |
| 3.2.3 Caracterización del deslizamiento..... | 31 |
| 3.3 Trabajo de laboratorio..... | 32 |
| 3.3.1 Método del picnómetro..... | 32 |
| 3.4 Trabajo de Gabinete | 33 |
| CAPÍTULO IV:INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS | 35 |
| 4.1 Geología Local | 36 |
| 4.1.1 Formación San José (Mioceno Medio)..... | 36 |
| 4.1.2 Formación Santo Domingo..... | 39 |
| 4.1.3 Coluviales (Cuaternario)..... | 41 |
| 4.1.4 Terrazas Aluviales (Cuaternario)..... | 42 |
| 4.1.5 Aguas Superficiales..... | 42 |
| 4.2 Estructuras Tectónicas Locales | 43 |
| 4.3 Ensayo de Tomografía Eléctrica..... | 45 |
| 4.3.1 Perfil A – A'..... | 46 |
| 4.3.2 Perfil B – B'..... | 48 |
| 4.3.3 Perfil C – C' | 50 |
| 4.4 Ensayo de Micro-gravimetría | 52 |
| 4.4.1 Perfil Gravimétrico A-A' | 53 |
| 4.4.2 Perfil Gravimétrico B – B'..... | 55 |
| 4.4.3 Perfil Gravimétrico C - C' | 57 |
| 4.5 Caracterización del Deslizamiento..... | 59 |
| 4.6 Discusión de Resultados | 61 |
| CONCLUSIONES | 63 |
| RECOMENDACIONES..... | 65 |
| BIBLIOGRAFIA..... | 66 |
| ANEXOS..... | 68 |

INDICE DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1. Mapa de la Ubicación Geográfica del Polígono de Estudio. | 7 |
| Figura 2. Mapa de Pendientes del área de estudio | 8 |
| Figura 3. Principal red hidrográfica..... | 9 |
| Figura 4. a) Geología Regional de la Cuenca Sedimentaria de Malacatos. b) Columnas estratigráficas del Mioceno de la Cuenca Sedimentaria Malacatos – Vilcabamba. | 12 |
| Figura 5. Límites fallados de la Cuenca de Malacatos, basado en “El Mapa de Fallas y Pliegues cuaternarios de Ecuador y Regiones Oceánicas Adyacentes” basado en Égüez et al., 2003..... | 13 |
| Figura 6. Principales configuraciones de los electrodos. | 18 |
| Figura 7. Esquema de la disposición del equipo en el campo y orientación del acople configuración dipolo - dipolo. | 26 |
| Figura 8. a) Esquema de la técnica roll along. b) Combinaciones de varios roll-along para la continuidad de un mismo perfil..... | 27 |
| Figura 9. Mapa geológico del polígono de estudio. | 44 |
| Figura 10. Ubicación de los perfiles de ERT. | 46 |
| Figura 11. Resistividades eléctricas del perfil A - A'. | 47 |
| Figura 12. Resistividades eléctricas del perfil B - B'. | 49 |
| Figura 13. Resistividades eléctricas del perfil C - C'..... | 51 |
| Figura 14. Ubicación de los perfiles gravimétricos en el área de estudio..... | 52 |
| Figura 15. Modelo gravimétrico de la línea A-A' | 53 |
| Figura 16. Correlación geológica del perfil A-A' | 54 |
| Figura 17. Modelo gravimétrico del perfil B-B'. | 55 |
| Figura 18. Perfil Geológico de la línea B-B'. | 56 |
| Figura 19. Modelo gravimétrico de la línea C-C' | 57 |
| Figura 20. Correlación geológica del perfil C - C'. | 58 |
| Figura 21. Mapa de ubicación de los deslizamientos. | 60 |
| Figura 22. Proyección estereográfica del bloque noroccidental (41°/37°) y la granja 83°/41°). | 61 |
| Figura 23. Mapa esquemático de fallas intracuenca y de borde de la parroquia de Malacatos. | 62 |

INDICE DE TABLAS

| | |
|---|----|
| Tabla 1. Coordenadas de Ubicación del Polígono | 7 |
| Tabla 2. Síntesis de las formaciones de la cuenca Malacatos. | 11 |
| Tabla 3. Clasificación de los Movimientos de Masa..... | 16 |
| Tabla 4. Resistividad por la naturaleza del terreno. | 19 |
| Tabla 5. Densidad de las principales rocas | 22 |
| Tabla 6. Coordenadas Geográficas de la base gravimétrica..... | 28 |
| Tabla 7. Coordenadas Geográficas de la Estación Topográfica. | 30 |
| Tabla 8. Coordenadas Geográficas de la toma de muestras. | 32 |
| Tabla 9. Software utilizados durante el procesamiento de datos. | 34 |
| Tabla 10. Parámetros de los perfiles geo-eléctricos. | 45 |
| Tabla 11. Coordenadas de los perfiles de Tomografía Eléctrica..... | 45 |
| Tabla 12. Características de los perfiles gravimétricos..... | 52 |

RESUMEN

La investigación describe los principales resultados obtenidos mediante la combinación de técnicas geofísicas. Para ello se registró e interpretó 2 perfiles longitudinales y 1 transversal para cada técnica ubicados en el movimiento de ladera del kilómetro 28 de la vía principal de Loja – Malacatos en el sector San José.

Con la combinación de la microgravimetría y ERT permitieron definir la geometría del movimiento, la posición del plano de deslizamiento, zonas con alto contenido de agua, límites y profundidades entre las secuencias sedimentarias así como la estructura tectónica que afectan al sector, las mismas que conjuntamente con la geología y observaciones de campo se ha determinado los diferentes factores condicionantes y desencadenantes del movimiento de ladera.

La principal ventaja de la metodología usada en los presentes trabajos geofísicos, es que son relativamente sencillos, no invasivos para el terreno y económicamente beneficiosos en el momento de ejecutarlos al contar con el equipo adecuado.

PALABRAS CLAVE: ERT, microgravimetría, deslizamientos.

ABSTRACT

The research describes the main results obtained through the combination of geophysical techniques. For this was registered and interpreted 2 longitudinal profiles and 1 transverse to each technique located in the movement from the slope of the kilometer 28 of the main route of Loja - Malacatos in the town of San José.

The combination of the microgravity and ERT allowed to define the geometry of the movement, the position of the slide plane, zones with high water content, limits and depths between sedimentary sequences as well as the tectonic structure affecting the site, the same as in conjunction with the geology and field observations has determined the different constraints and triggers of the movement of the hillside.

The main advantage of the methodology used in the present geophysical work, is that they are relatively simple, non-invasive for the terrain and economically beneficial at the time of execution when counting with the proper equipment.

KEYWORDS: ERT, microgravity, landslides.

INTRODUCCIÓN

Los ensayos geofísicos nos permiten obtener de la forma más rápida y económica información acerca de las características y estructuras del subsuelo mediante la interpretación de los diferentes parámetros obtenidos a partir de las mediciones y observaciones realizadas en el campo. Cada técnica geofísica se adapta a una situación geológica en particular por lo que es conveniente en muchas ocasiones la aplicación combinada de más de un método obteniendo resultados más precisos. De esta manera, la presente investigación se ha combinado el método de Tomografía de Resistividad Eléctrica y Microgravimetría con el objetivo de realizar una caracterización geológica completa acerca del movimiento de ladera ubicado en el Km 28 de la vía principal de Loja – Malacatos Sector San José.

El presente trabajo se lo ha distribuido por capítulos. El capítulo uno “Generalidades” corresponde a la descripción general del lugar de estudio como su ubicación geográfica, principales accesos, clima, flora y fauna característica del sector así como su geomorfología, relieve, principales afluentes hidrológicos y la geología regional.

El capítulo dos “Marco Conceptual” engloba la fundamentación teórica, detallándose la clasificación de los movimientos de ladera, parámetros y mecanismos de falla, así como conceptos, fórmulas, protocolos y configuraciones de los métodos geofísicos a usar.

El capítulo tres “Metodología” realiza una descripción del proceso usado bajo el cual se han realizado la toma de datos de las diferentes campañas geofísicas, datos geológicos - estructurales en el campo y puntualiza la etapa del procesamiento de datos con el uso de los diferentes software.

El capítulo cuatro “Interpretación de Resultados” inicia con la descripción de la geología local de la zona obtenida a partir del mapeo la misma que se la correlaciona con los datos de resistividad y microgravimetría obteniendo como resultado las diferentes secciones geológicas de los perfiles y mapas que ayudarán en la caracterización del deslizamiento determinando el tipo de movimiento, mecanismos de rotura, causas etc. Se obtiene las conclusiones en base a los objetivos de la presente investigación.

Finalmente se presenta los anexos, donde se encuentra la descripción detallada de los afloramientos, ficha del movimiento de ladera, perfiles geo-eléctricos, mapas como resultado de la presente investigación.

ANTECEDENTES

Los riesgos geológicos constituyen una fuente constante de peligros y amenazas para el medio ambiente, viviendas y el ser humano. Uno de los principales problemas geológicos son los movimientos en masa causados por agentes naturales como: lluvias, actividad sísmica y por influencia de las diferentes actividades del hombre. Teniendo como consecuencia la destrucción de viviendas, carreteras, etc. El movimiento de ladera estudiado en la parroquia de Malacatos está ubicado en el kilómetro 28 por la vía principal de Loja - Malacatos el cual afecta al Sector de San José y El Sauce.

Morocho (2014) realizó una caracterización del deslizamiento mediante la aplicación del método de tomografía eléctrica bajo la configuración Wenner – Slumberguer definiendo zonas saturadas y niveles freáticos como los principales factores detonantes del movimiento de ladera.

Existen estudios gravimétricos regionales relacionados con la cuenca de Malacatos. Tamay (2015) realizó el levantamiento de perfiles gravimétricos transversales y longitudinales de las cuencas sedimentarias de Loja, Malacatos-Vilcabamba y Catamayo en las que da a conocer la geometría y profundidad de relleno de las cuencas así como su relación con los eventos tectónicos ocurridos durante el desarrollo de la misma. Elizalde (2015) realizó el levantamiento de datos gravimétricos en las formaciones sedimentarias de la cuenca de Malacatos determinando la profundidad del relleno sedimentario. Para el área de investigación no existen registros a detalle de estudios de Micro – gravimetría aplicada para la caracterización geométrica del deslizamiento.

En cuanto a estudios geológicos la cuenca de Malacatos ha sido estudiada por numerosos autores como: Wolf (1892), Bristow y Hoffstetter (1977), Saucer (1965), Naciones Unidas (U.N.D.P., 1969), L.B Kennerley (1973), Kennerley y Almeida (1975), Putzer (1985), Litherland (1994), Dominic Hungerbühler (1977, 2002) denominó al bloque nororiental como “La Granja” parte sobre la cual se encuentra el área del presente estudio. Medina (2014) realizó una validación geológica – estructural de la cuenca sedimentaria de Malacatos, aportando con nueva información.

En la presente investigación se empleará métodos geofísicos combinados (ERT y Micro-gravimetría) para generar geo información y determinar la geometría del movimiento de ladera.

OBJETIVOS

En la realización del presente proyecto se plantearon los siguientes objetivos:

- **Objetivo general:**

Determinar la geometría del movimiento de ladera de Malacatos aplicando métodos geofísicos ERT y Microgravimetría.

- **Objetivos específicos:**

- Caracterización geológica y toma de muestreos en el área de estudio.
- Determinar los valores de resistividad del suelo aplicando líneas de tomografía eléctrica (ERT) en superficie.
- Determinar variaciones de la densidad de los diferentes materiales litológicos aplicando líneas de microgravimetría
- Determinar el tipo de movimiento, mecanismos de ruptura y las posibles causas que han producido el deslizamiento.
- Correlacionar los diferentes datos geológicos y geofísicos para obtener información en la interpretación de datos.

CAPÍTULO I

GENERALIDADES

1.1 Ubicación geográfica y acceso

El área de estudio se encuentra ubicada al Sur de la región andina del Ecuador, aproximadamente a 28 km del cantón y ciudad de Loja, en la parroquia de Malacatos (Figura 1). La principal vía de acceso es de primer orden y une los poblados de Loja - Malacatos - Vilcabamba.

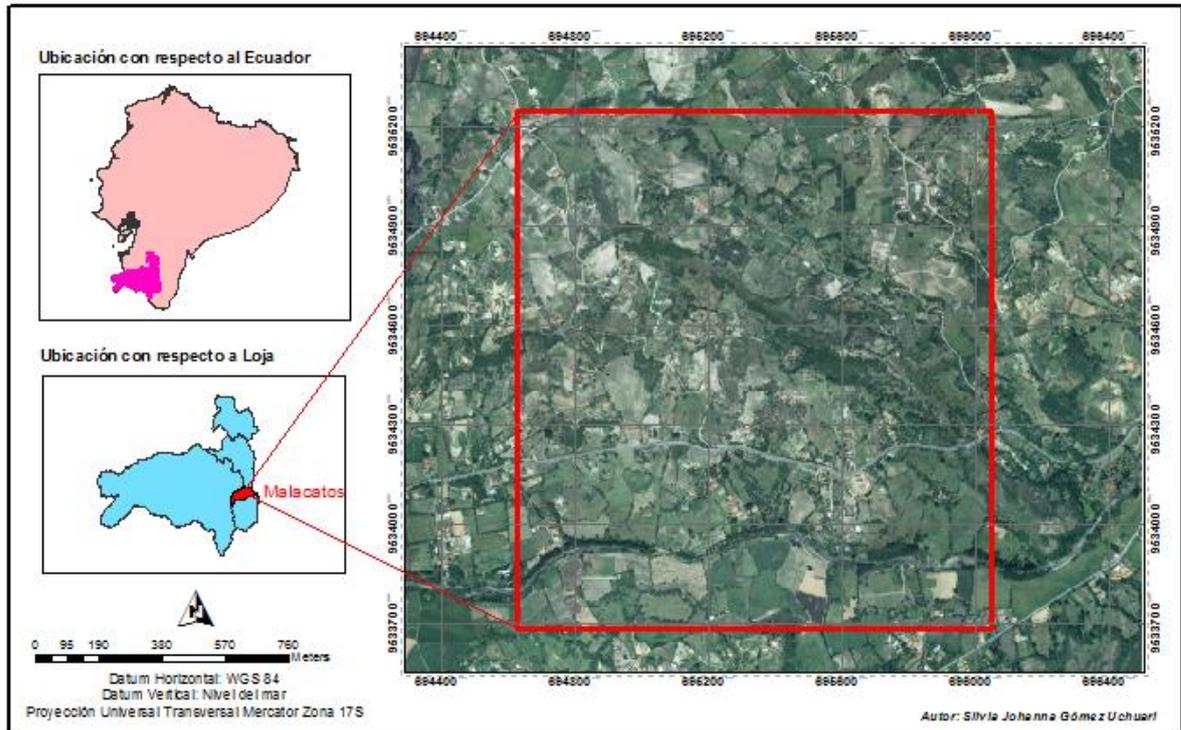


Figura 1. Mapa de la Ubicación Geográfica del Polígono de Estudio.
Elaboración: La Autora.

La zona de estudio se enmarca en las siguientes coordenadas:

Tabla 1. Coordenadas de Ubicación del Polígono.

| Puntos | X | Y |
|--------|-----------|------------|
| P1 | 694647,71 | 9535224,45 |
| P2 | 696023,99 | 9535224,45 |
| P3 | 694647,71 | 9533703,99 |
| P4 | 696023,99 | 9533703,99 |

Elaboración: La Autora.

1.2 Clima

La cuenca de Malacatos tiene un clima subtropical – seco con veranos calurosos y lluvias escasas con temperaturas que varían entre 18 y 21.9°C. En las partes más elevadas (sobre 1900 m.s.n.m) presenta un clima temperado entre 12.0 y 17,9°C (GAD de Malacatos, 2012).

1.3 Geomorfología

El polígono mayoritariamente en la región Norte y Sur morfológicamente exhibe pendientes de carácter suave (5 – 12°) a media (12 – 25°) perteneciente a la formación Santo Domingo. La formación San José muestra pendientes de media fuerte (25° - 40°) a fuerte (40° - 70°) la cual está asociada a la tectónica que afecta al sector. A los costados del río Malacatos predomina los relieves de laderas muy suaves (2° - 5°) a planas (0° – 2°) representando las terrazas aluviales (Figura 2).

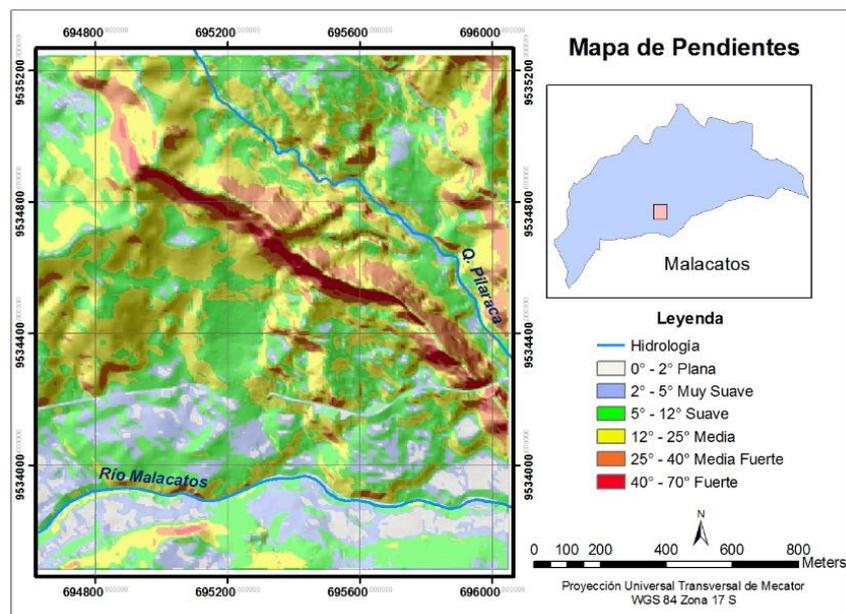


Figura 2. Mapa de Pendientes del área de estudio.
Elaboración: La Autora.

1.4 Relieve e Hidrografía

La cuenca sedimentaria de Malacatos se encuentra dentro de los nudos de Cajanuma y Sabanilla. El relieve orográfico de la cuenca presenta zonas muy accidentadas con pendientes abruptas por formar parte de la cadena montañosa de los Andes, hacia la parte central de la cuenca los depósitos sedimentarios forman valles tipo U.

La principal red hidrográfica (Figura 3) que constituye la zona de estudio es al sur por el río Malacatos el cual corre en dirección noreste – suroeste siendo alimentado por sus diferentes afluentes provenientes del nudo Cajanuma y caudales estacionales de escorrentía.

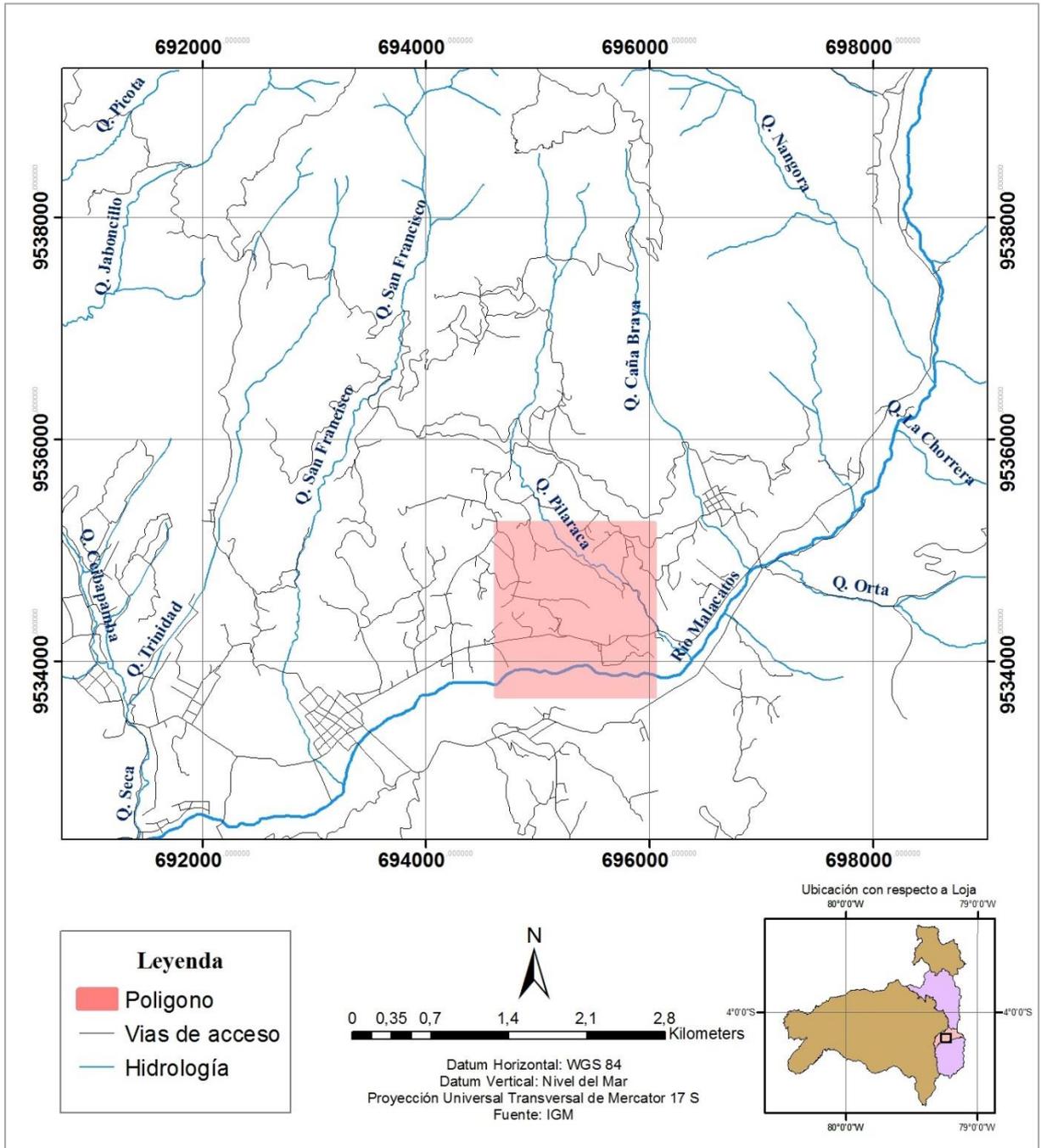


Figura 3. Principal red hidrográfica.
Elaboración: La Autora.

1.5 Geología regional

La cuenca de Malacatos-Vilcabamba está formada por una serie de formaciones geológicas de edad miocénica, que pertenecen a la Formación Quinara, San José, Santo Domingo y formando una discordancia angular la Formación Cerro Mandango; La serie sedimentaria descansa hacia el Este sobre un basamento de rocas metasedimentarias de la Unidad Chigüinda y al Oeste en sedimentos volcánicos de la formación Loma Blanca (Tamay et al., 2015).

- **Unidad Chigüinda (Paleozoico)**

Constituye el basamento de las formaciones sedimentarias en el sector Este, formado por cuarcitas, mica, esquistos grafitosos y pizarras (Hungerbühler et al., 2002).

- **Formación Loma Blanca (Oligoceno Mioceno)**

La Formación Loma Blanca contempla la parte basal en un aglomerado, consta de piroclásticos intermedios a ácidos, es decir, principalmente ignimbritas, tobas cristalinas, pómez y brechas volcánicas (Hungerbühler et al., 2002).

- **Formación Quinara (Mioceno medio temprano)**

Se encuentra principalmente en el dominio sur formada por: tobas ácidas vítricas blancas o grises, ignimbritas, y brechas volcánicas. No tiene una formación volcánica correlativa en la región y representa los restos de un evento volcánico local (Hungerbühler et al., 2002).

- **San José (Mioceno Medio)**

La Formación San José sustituye a la Fm. Algarrobillito de Kennerley y se relaciona con la cuenca de Loja con la Formación Trigal. La formación se compone principalmente de areniscas calcáreas de espesor variable y calizas micríticas. Adicionalmente existen brechas bioclásticas, lechos de grava en forma de hoja con piedras volcánicas, pizarras bioturbadas. El espesor máximo de la formación es de 200 m. Las areniscas calcáreas y calizas contienen abundantes ostrácodos, bivalvos, gasterópodos, escafópodos, foraminíferos, dientes y huesos de pescado. La fauna y la información de facies indica que se depositó en un ambiente denominado delta marea (Hungerbühler et al., 2002).

- **Santo Domingo (Mioceno Medio)**

Kennerley (1973) la denomina Fm. Calavera y Fm. Algarrobillo y la relaciona con la cuenca de Loja con la Formación San Cayetano. La formación se encuentra en el dominio norte y en el bloque de La Granja constituyendo la secuencia media de la cuenca. Es dividida en dos miembros: El Mb. Carbón compuesto por secuencias repetidas de esquistos bituminosos, lutitas, limolitas e intervalos de arenisca y lateralmente vetas de carbón. El Mb. yeso en forma de laminaciones en las capas de arenisca de grano medio, presentan laminaciones tipo ripple. Las facies de la Formación Santo Domingo involucra un ambiente de depósitos deltaicos costeros con predominios de las mareas y entornos pantanosos, similar a la Formación San José (Hungerbühler et al, 2002).

- **Cerro Mandango (Mioceno Superior)**

Kennerley y Almeida (1975) la relacionan con la cuenca de Loja denominándola Formación Quillollaco. Se superpone a la Formación Santo Domingo en discordancia angular a las rocas metamórficas y se sobrepone discordantemente a la Formación Quinara. Hungerbühler la subdivide en dos miembros: El Miembro Arenisca formado por areniscas de grano mediano y grueso, capas y láminas de gravas con cantos metamórficos y en menor cantidad limolita. El Miembro Conglomerado formado por clastos metamórficos, areniscas gruesas y limolitas. En algunos lugares posee cristal blanco, clastos líticos, tobas, areniscas tobáceas y brechas pómez. La sucesión de facies representa una transición denominado sistema fluvial de arena y de un abanico aluvial que va de S a N (Hungerbühler et al., 2002).

Tabla 2. Síntesis de las formaciones de la cuenca Malacatos.

| Kennerley (1973) | Kennerley y Almeida (1975) | Hungerbühler (1977) |
|-------------------------|-----------------------------------|----------------------------|
| Cerro Mandango | Quillollaco | Cerro Mandango |
| Calavera | San Cayetano | Santo Domingo |
| Algarrobillo | Trigal | San José |
| Loma Blanca | Loma Blanca | Quinara |
| | | Loma Blanca |
| Zamora | Zamora | Tres Lagunas |
| | | Chiguinda |

Elaboración: La Autora.

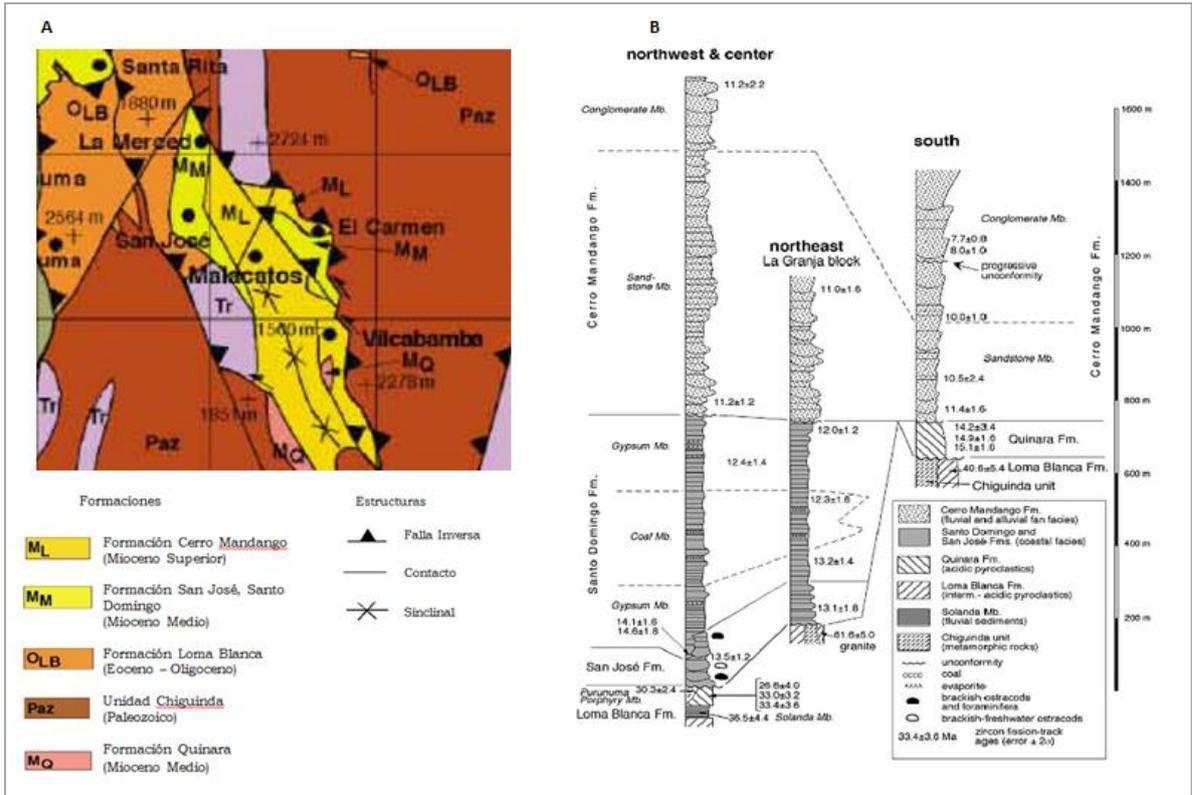


Figura 4. a) Geología Regional de la Cuenca Sedimentaria de Malacatos. b) Columnas estratigráficas del Mioceno de la Cuenca Sedimentaria Malacatos – Vilcabamba. Fuente: Hungerbühler, 2002

1.6 Marco Geotectónico

La cuenca sedimentaria de Malacatos se encuentra afectada por fallas de carácter regional y por fallas locales de menor extensión. Las mismas que establecen los límites de la cuenca y contactos tectónicos entre las diferentes formaciones geológicas.

De acuerdo al “Mapa de Fallas Activas y Pliegues Cuaternarios de Ecuador” (Figura 5), Malacatos se encuentra limitada al Este por la falla inversa “Loja” con una dirección N-S y buzamiento al E cual presenta varias ramificaciones afectando a la Formación Chigüinda. La falla inversa “Solanda” constituye el límite occidental de la cuenca la cual tiene una dirección N-S y NW – SE con buzamiento al W, afectando a la formación Loma Blanca separándola de la Formación Chigüinda en un contacto discordante. El norte de la cuenca se encuentra limitada por la falla inversa inferida de “El Tambo”, presenta una dirección NW – SE con buzamiento al NE la misma que presenta ramificaciones afectando al basamento y formaciones sedimentarias. La falla inversa “San Francisco” con una dirección NE-SW divide a la cuenca de Malacatos en dos bloques: el bloque noroccidental y el bloque “La Granja”.

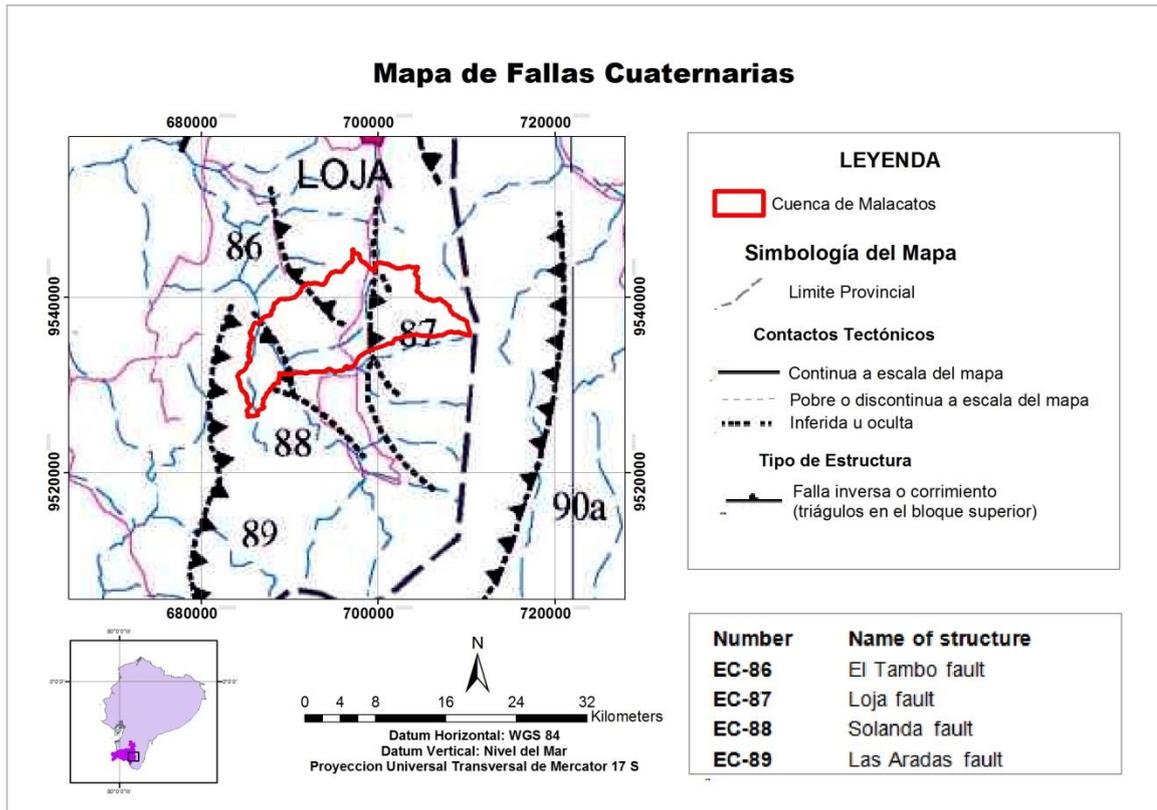


Figura 5. Límites fallados de la Cuenca de Malacatos, basado en “El Mapa de Fallas y Pliegues cuaternarios de Ecuador y Regiones Oceánicas Adyacentes” basado en Égüez et al., 2003. Elaboración: La Autora.

CAPITULO II

MARCO CONCEPTUAL

2.1 Movimientos de ladera

Los diferentes procesos geodinámicos modifican la superficie de la Tierra generando movimientos del terreno con diversas características físicas siendo los más frecuentes los movimientos de ladera. De acuerdo a Highland & Bobrowsky, (2008) los movimientos de masa es un término habitual usado para describir el movimiento descendente del suelo, rocas y materiales orgánicos generado por la acción de la gravedad y de la forma del terreno resultante.

2.1.1 Mecanismos de Falla.

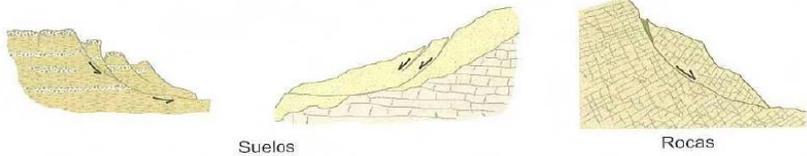
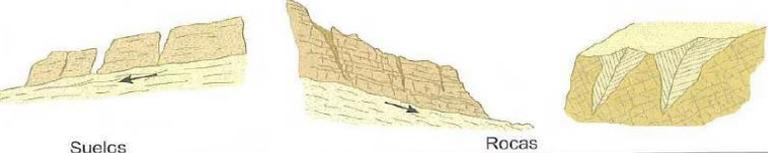
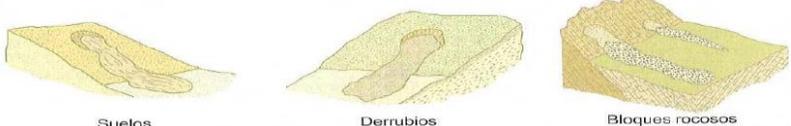
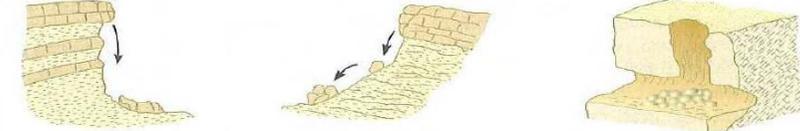
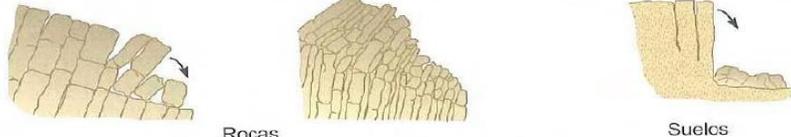
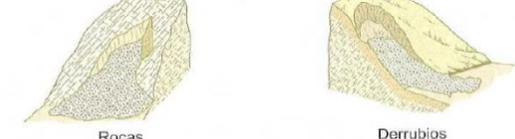
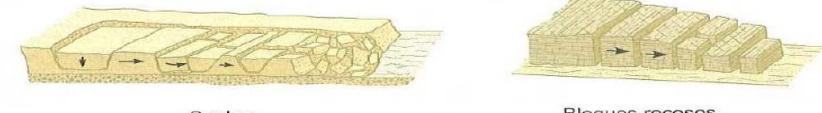
Los factores que controlan la estabilidad de las laderas son aquellas capaces de modificar las fuerzas internas y externas que actúan sobre el terreno. Según Suarez, (1998), los factores pueden ser:

- Factores Geométricos.- La distribución del talud como la pendiente, curvatura y dimensiones son factores que pueden actuar en conjunto o por separado determinando fuerzas de gravedad que provocan los movimientos.
- Factores Geológicos.- La geología determina las propiedades del suelo o roca en base a su génesis, estructuras, discontinuidades, meteorización, los cuales facilitan movimientos a lo largo de los planos de debilidad.
- Factores Hidrológicos e Hidrogeológicos.- Los cambios en el régimen de aguas subterráneas y superficiales actúan como detonantes de movimientos de ladera modificando su resistencia.
- Factores Geotéctonicos.- La resistencia al corte, permeabilidad, ángulo de fricción y cohesión representan parámetros en la modelación física del deslizamiento.
- Factores Ambientales y Antrópicos.- El clima actúa en el proceso de meteorización, otros factores influyentes en los movimientos de masa son la evaporación, sismos, vegetación y la actividad humana.

2.1.2 Clasificación de los deslizamientos.

Se ha resumido una clasificación de movimientos de ladera (Tabla 3) en función de los mecanismos de ruptura y tipo de material.

Tabla 3. Clasificación de los Movimientos de Masa.

| | | |
|--|--|--|
| <p>Deslizamiento Rotacional</p> |  <p>Suelos Rocas</p> | <p>Son más frecuentes en suelos cohesivos “homogéneos”. La ruptura tiene a lugar a favor de superficies curvas o en forma de cuchara pudiendo dividirse en varios bloques que deslizan entre si y dan a lugar a escalones.</p> |
| <p>Deslizamiento Traslacional</p> |  <p>Suelos Rocas</p> | <p>La ruptura tiene a lugar a favor de superficies planas de debilidad preexistentes o suavemente ondulante y la masa se mueve paralela a la superficie del terreno. No suelen ser muy profundos pero si extensos.</p> |
| <p>Flujos</p> |  <p>Suelos Derrubios Bloques rocosos</p> | <p>Son movimientos de masas de suelos, derrubios o bloques rocosos con abundante presencia de agua, donde el material está disgregado y se comporta como un fluido.</p> |
| <p>Desprendimientos</p> |  <p>Rocas Suelos</p> | <p>Son caídas libres muy rápidas de bloques rocosos independizadas por planos de discontinuidad preexistente. Son más frecuentes las rupturas en forma de cuña</p> |
| <p>Vuelcos</p> |  <p>Rocas Suelos</p> | <p>Se produce cuando los estratos buzcan en sentido contrario a la ladera por estar fracturados en bloques o rotura de la zona de pie de la ladera.</p> |
| <p>Avalanchas</p> |  <p>Rocas Derrubios</p> | <p>Considerados como desprendimientos, son muy rápidos, con caídas de masa de rocas o derrubios que se desprenden de laderas escarpadas y pueden ir acompañadas de hielo y nieve.</p> |
| <p>Desplazamiento lateral</p> |  <p>Suelos Bloques rocosos</p> | <p>Se denomina extensión o esparcimiento lateral a los movimientos con componentes principalmente laterales, en taludes de baja pendiente</p> |

Elaboración: La Autora, basado en González de Vallejo, 2004.

2.2 Tomografía de Resistividad Eléctrica

2.2.1 Definición.

El método de tomografía es una técnica geofísica eléctrica que proporciona información detallada de la resistividad del subsuelo, a partir de medidas realizadas desde la superficie del terreno o sondeos.

La Tomografía de Resistividad Eléctrica (ERT por sus siglas en inglés) consiste en un conjunto de electrodos distribuidos en una matriz lineal, donde una corriente eléctrica se inyecta a través de un par de electrodos de origen y de la diferencia de potencial se inyecta entre otros pares de electrodos (Martinez et al., 2013). La resistividad aparente (φ_a) se determina por la relación entre el potencial (V) y la intensidad de corriente (I) multiplicado por un factor geométrico (k)

$$\varphi_a = \frac{V}{I} k \quad (2.1)$$

2.2.2 Arreglos geométricos de los electrodos.

Los arreglos geométricos de electrodos son disposiciones formadas por dos pares de electrodos siendo dos emisores y dos receptores (Figura 6). A través de los electrodos emisores (A y B) se inyecta corriente al terreno midiendo su intensidad y a través de los receptores se mide la diferencia de potencial entre los electrodos (M y N) donde el espaciamiento es n veces de la distancia inicial a . Los principales arreglos son:

- Arreglo Wenner.- Los electrodos se sitúan de manera equidistante sobre una línea recta $AMNB$ donde su factor geométrico resultante es $K=2\pi a$. Este tipo de arreglo es utilizado para detectar estructuras horizontales, estratos sedimentarios y en geotecnia (Loke, 2000).
- Arreglo Schlumberger.- se colocan los electrodos $AMNB$ dispuestos en una línea, donde la distancia MN es menor que la distancia de los inyectores AB (Cantos, 1987).
- Arreglo Dipolo – Dipolo.- Consiste en colocar los electrodos de corriente juntos al igual que los electrodos de potencial, con una distancia inicial a y se van a separar n veces de a (Loke, 2000).
- Arreglo Wenner – Schlumberger.- es una combinación entre los dispositivos Wenner y Schlumberger. La configuración utiliza distancias de espaciado mixtas combinando

medidas para obtener mejores resultados. Usado para detectar estructuras geológicas tanto verticales como horizontales (Loke, 2000).

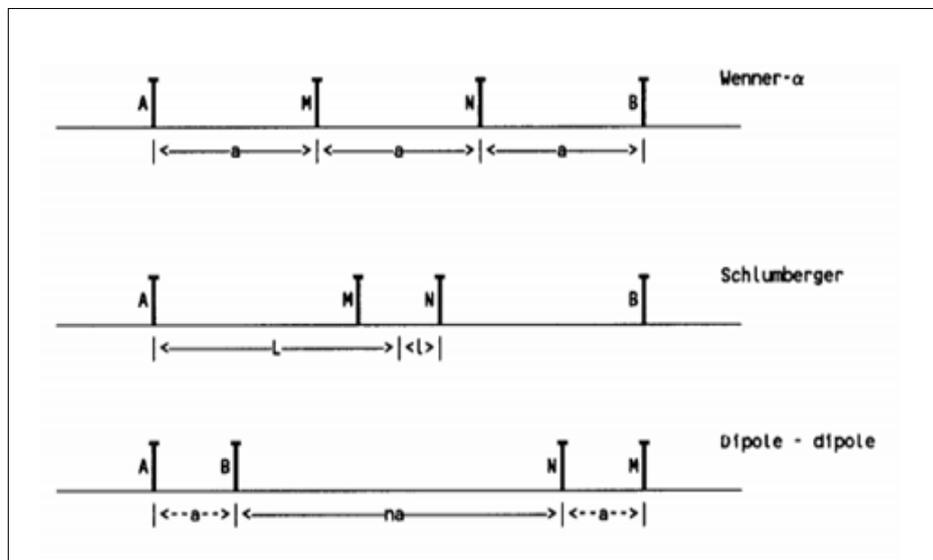


Figura 6. Principales configuraciones de los electrodos.

Fuente: ABEM, 2009

2.2.3 Relación de la geología y resistividad.

La variación de la resistividad eléctrica de los distintos materiales que conforman el suelo depende de varios parámetros geológicos como son los contenidos de minerales, porosidad, litología, grado de saturación de la roca, composición de la roca y el contenido de fluidos que son factores que van a condicionar la existencia del valor de la resistividad (Porres, 2003).

Las rocas ígneas y metamórficas por su grado de compactación tienen valores de resistividad elevados dependiendo del grado de fracturación y del porcentaje de agua que rellena estas fracturas. Las rocas sedimentarias, por el contrario, son más porosas y tienen mayor contenido de agua por lo que generalmente tienen valores bajos de resistividad. Los suelos húmedos y el agua freática tienen valores muy bajos de resistividad.

Los métodos geoelectrónicos permiten la obtención de una imagen detallada de la distribución de resistividades del subsuelo. Para convertir esa imagen en un perfil geológico, es muy importante conocer cómo varía la resistividad en los diferentes tipos de materiales que constituyen el subsuelo y estructuras geológicas. Para ello es necesario definir los valores de resistividad que presentan las rocas, descritas en la tabla 4.

Tabla 4. Resistividad por la naturaleza del terreno.

| Naturaleza del Terreno | Resistividad (ohm.m) |
|-------------------------------|-----------------------------|
| Terrenos pantanosos | 3 a 30 |
| Limo | 20 a 100 |
| Humus | 100 a 150 |
| Turba húmeda | 5 a 100 |
| Arcilla húmeda | 10 ⁻¹ a 1 |
| Arcilla plástica | 50 |
| Margas | 50 a 500 |
| Lutita | 20 a 1000 |
| Arena arcillosa | 50 a 500 |
| Arena sílice | 200 a 3000 |
| Conglomerado | 1000 a 10 ⁴ |
| Caliza blanda | 100 a 300 |
| Caliza compacta | 1000 a 5000 |
| Caliza agrietada | 500 a 100 |
| Pizarra | 50 a 300 |
| Conglomerado | 1000 a 10 ⁴ |

Fuente: Loke, 2000 y Milsom, 2003

2.3 Microgravimetría

2.3.1 Conceptos Fundamentales.

El método gravimétrico se basa en mediciones en superficie de las diferentes variaciones de anomalías de la componente vertical del campo terrestre. Estas variaciones son causadas por una distribución irregular en profundidad de masas de diferentes densidades, por lo que al determinarlas se puede realizar una interpretación posible de la condición de las masas en el subsuelo, dependiendo del conocimiento geológico y de la distribución de las densidades (Cantos, 1987).

La microgravimetría permite el descubrimiento de cuerpos cerca de la superficie de menor dimensión con una densidad diferente a la que lo rodea por lo que es un método de campo natural y relativamente económico aplicado en las fases preliminares de diferentes estudios geológicos.

Las anomalías gravimétricas suelen expresarse en miligales que es la milésima parte del gal que es la unidad c.g.s de aceleración ($1 * 10^{-3} \text{ cm/s}^2$), y la aceleración media de la gravedad está en torno a 980 cm/s^2 (Parasnis, 1970).

2.3.2 Ley de la Gravitación Universal.

El fundamento físico-mecánico del método se basa en la “Ley de la Gravitación Universal de Newton”, la cual establece que la fuerza (F) de atracción mutua entre dos partículas de masa m_1 y m_2 es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia (r) entre ellas.

$$F = G \frac{m_1 m_2}{r^2} \quad (2.2)$$

Donde G es la constante de la Gravitación Universal

$$G = 6,673 * 10^{-11} N * m^2 / Kg^2 \quad (2.3)$$

2.3.3 Mediciones de la Gravedad.

En geofísica, al usar la gravedad para determinar información estructural es conveniente el uso de los valores relativos que los absolutos definiendo contrastes de in-homogeneidades y densidades en la parte de la Tierra. En resumen lo que interesa más son las anomalías gravitatorias (Reyes, 2006). El valor absoluto de la gravedad varía aproximadamente de 978 000 miligales en el Ecuador a 983 000 miligales en los Polos.

La magnitud de la gravedad en la Tierra depende de varios factores como: latitud, elevación, topografía, mareas terrestres y variaciones de la densidad en el subsuelo. Por ello, se debe realizar correcciones eliminando los efectos producidos por estos factores y determinar una anomalía.

De acuerdo con el Sistema Geodésico de referencia, el valor de g_0 al nivel del mar varía con la latitud φ , de la siguiente forma:

$$g_0 = 978031,846 (1 + 0,005278895 \sin^2 \varphi + 0,000023462 \sin^4 \varphi) \quad (2.4)$$

2.3.3.1 Gravedad absoluta.

La medida del valor absoluto precisa de instrumentos de manipulación compleja difíciles de transportar y un amplio tiempo de operación. Los métodos usados son el de caída libre de cuerpos y el de oscilación de un péndulo (Cantos, 1987).

2.3.3.2 Gravedad Relativa.

Las medidas relativas se pueden hacer usando métodos dinámicos y de fácil traslado como el péndulo o métodos estáticos como la balanza de torsión y gravímetros, convirtiéndose el último como el método más usado actualmente (Cantos, 1987).

2.3.4 Anomalía de Bouguer.

Para obtener la anomalía de Bouguer se deben realizar las respectivas correcciones de las lecturas de la gravedad observada. Siendo estas:

- Corrección de aire libre: Corrige la disminución de la gravedad en el aire libre con la altura como resultado del aumento de la distancia al centro de la Tierra (Gallastegui, 2000).

$$C_{AL} = 0,3086 h \text{ (mgal/m)} \quad (2.5)$$

- Corrección de Bouguer: esta corrección tiene en cuenta la atracción del material rocoso situado entre el nivel del mar y la estación situada a una altura h .

$$C_B = 0,4191 \rho h \text{ (mgal/m)} \quad (2.6)$$

ρ = densidad media de la corteza terrestre, $2,67 \text{ g/cm}^3$ (En prospección se reemplaza por la densidad media de la zona de trabajo)

- Corrección Topográfica: toma en cuenta el relieve del entorno de la estación de medida y corrige el error introducido en el cálculo de la anomalía de Bouguer al asumir que el relieve es plano (Gallastegui, 2000). Se emplea programas informáticos que la calculan mediante la aplicación de modelos digitales de terreno.

Una vez realizadas todas las correcciones a las lecturas de la gravedad observada, se obtiene el valor de la anomalía de Bouguer para la estación, así:

$$A_B = g_{obs} + C_{AL} - C_B + C_T - g_o \quad (2.7)$$

Dónde:

g_{obs} = gravedad observada (mgal)

C_{AL} = corrección de aire libre (mgal/m)

C_B = corrección de Bouguer (mgal(m))

C_T = corrección topográfica

g_o = gravedad teórica (mgal)

2.3.5 Densidad de las rocas.

En el interior de la Tierra puede haber desplazamientos sumamente lentos de masas y modificadores de densidad, capaces de originar variaciones de la fuerza de la gravedad (Mironov, 1977). Las anomalías gravimétricas resultan de la diferencia de densidad entre los cuerpos de roca y sus alrededores por lo que en estudios gravimétricos lo que generalmente se mide es la variación lateral de la densidad de las rocas (Tabla 5).

Tabla 5. Densidad de las principales rocas.

| Densidad de las rocas ígneas y metamórficas | | |
|---|----------------------------------|----------------------|
| Roca | Densidad en (g/cm ³) | |
| | Media | Límites de variación |
| Granito | 2,6 | 2,4 - 2,7 |
| Granodiorita | 2,7 | 2,7 - 2,8 |
| Diorita | 2,8 | 2,7 - 2,9 |
| Sienita | 2,8 | 2,6 - 2,9 |
| Gabro | 2,9 | 2,7 - 3,3 |
| Basalto | 3,0 | 2,6 - 3,3 |
| Cuarcita | 2,7 | 2,7 - 2,8 |
| Mármol | 2,7 | 2,3 - 3,0 |
| Gneis | 2,7 | 2,6 - 3,2 |
| Serpentina | 2,6 | 2,4 - 3,0 |
| Rocas Sedimentarias | | |
| Arcilla | 2,3 | 1,6 - 2,8 |
| Arenas arcillosa | 2,1 | 2,0 - 2,4 |
| Areniscas | 2,3 | 2,1 - 2,8 |
| Margas | 2,2 | 2,0 - 2,6 |
| Caliza | 2,5 | 2,1 - 2,9 |
| Suelo | 2,0 | 2,1 - 2,3 |

Fuente: Mironov, 1977

CAPÍTULO III

METODOLOGIA DE TRABAJO

3.1 Documentación y validación de la información existente

En la primera etapa de este estudio se realizó la recopilación de información bibliográfica, investigaciones relacionadas en el área y sobre el tema de estudio, interpretación de ortofotos, un modelo digital de terreno para la generación de la topografía de la zona de estudio, también la cartografía geológica base como mapas geológicos elaborados de la zona cual corresponde a los datos presentados en el estudio de las cuencas sedimentarias del sur del Ecuador por Hungerbühler et al. (2002). La obtención de información base como redes hídricas y carreteras de la zona se la adquirió del Instituto Geográfico Militar, georeferenciada al elipsoide WGS 84, zona 17 del hemisferio Sur a escala 1:50000.

Para el manejo adecuado de los equipos se hace alusión a los manuales de operación del Autograv CG-5 de Scintrex y Terrameter SAS 4000/ 1000 de ABEM, así como de manuales de los software a utilizarse en la corrección y procesamiento de los datos obtenidos en campo.

3.2 Trabajo de campo

3.2.1 Ensayos Geofísicos.

3.2.1.1 Ensayo de Tomografía Eléctrica.

Para el ensayo de tomografía eléctrica se usó el Terrameter SAS 4000/SAS 1000 el cual es indicado para estudios de resistividad, estudios IP y estudios de potencial espontáneo. Conjuntamente con el sistema ABEM LUND que es un sistema de representación eléctrica automática, adecuada para efectuar perfiles de resistividad.

El equipo al ser activado comprende una alimentación de energía por batería, un medidor de resistividad con una salida suficiente para una separación de electrodos de 2000 metros en buenas condiciones. Mide las tensiones de respuesta creados por la corriente del transmisor mientras se eliminan tanto la tensión de corriente continua (SP) como el ruido. El equipo selecciona automáticamente la amplitud de la corriente pero también puede ser controlada por el operador para acoplar en las condiciones actuales de la zona. Puede ponerse valores desde 1 mA hasta 1000 mA. La tensión máxima en los electrodos normales es de 400 V. Se recomienda emplear el *AUTO setting* donde el aparato coloca el valor óptimo. La relación V/I se muestra digitalmente de 3 a 4 dígitos en kilo-ohmios ($k\Omega$), ohmios (Ω) o mili-ohmios ($m\Omega$). Algunas veces el equipo puede arrojar lecturas negativas de la resistividad, las cuales generalmente no están causadas por las formaciones geológicas siendo el motivo más probable por un elevado nivel de ruido o por perturbaciones (ABEM, 2009)

El equipo empleado en la adquisición de datos de tomografía eléctrica fue:

- Terrameter SAS 1000/4000
- Sistema Lund
- 4 carretes de cable con 21 tomas cada uno
- Electrodo de acero inoxidable
- Martillos de poliuretano
- Pinzas de cocodrilo
- Dos conectores
- Batería externa de 12V
- Material auxiliar: cinta métrica, GPS, brújula.



Foto 1. Equipo de tomografía eléctrica para la toma de datos de resistividad del suelo.
Fuente: La Autora.

Es importante realizar preparativos previos antes de la toma de datos con el equipo como recorrer la zona de estudio con días de anticipación para definir donde pueden ir las posibles líneas del perfil, su longitud, etc. Una vez definidas se procede a la planificación del trabajo.

Para la obtención de la resistividad del presente estudio se aplicó la configuración Dipolo-Dipolo y se midió las líneas en sentido longitudinal (S-N) y perpendicular (W-E) a la dirección del deslizamiento. Se inició colocando el Terrameter SAS 4000/1000 en el primer punto de medida del perfil (tabla 11) asegurándonos que el equipo esté protegido. Se clavaron los electrodos de acero en el terreno siguiendo las líneas de los perfiles (tabla 10) a una distancia n de separación tomando en cuenta que los electrodos estén bien clavados para evitar errores en las medidas.

Se extendió el cable en dirección del perfil (tabla 10) conectando los carretes # 1 y # 2 entre sí utilizando un conector de color blanco tomando en cuenta que las ranuras de los acoples deben apuntar hacia el equipo de medida. Se realizó lo mismo con los carretes # 3 y # 4 (Figura 7). A continuación, con la ayuda de lagartos o pinzas de cocodrilos se conectó el cable con los electrodos. En la unión del final del carrete con el inicio del otro se instala los dos cocodrilos en el mismo electrodo.

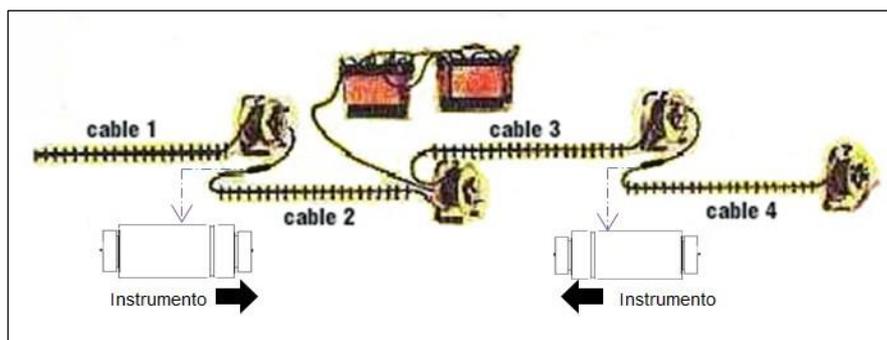


Figura 7. Esquema de la disposición del equipo en el campo y orientación del acople configuración dipolo - dipolo.

Fuente y Elaboración: La Autora, basado en el manual de ABEM, 2009

Se conectó el Terrameter SAS 1000/4000 al sistema ABEN LUND mediante la clavija TERRAMETER OR PREVIOUS ES10-64. Se realizó lo mismo con el final del cable del carrete #2 en la clavija (COM 1-32) y el inicio del cable del carrete #3 en la clavija (COM 32-64). Finalmente, el SAS acoplado con el sistema Lund será alimentado por una batería externa de 12 V, se conecta la batería polo positivo con el cable rojo y negativo con el cable negro.

Se configura el equipo, comprobando que el modo puesto sea en IP. Para realizar las medidas se activa el botón *Measure* del equipo. Cada medición se guarda automáticamente en el equipo para su posterior tratamiento con el software RES2DINV. Se debe tomar precauciones cuando el equipo esté operando, mantener a personas y animales lejos de los cables y del resto de accesorios conectados. De igual manera tener cuidado con fuentes cercanas de alta tensión que puedan dañar al equipo.

Si los perfiles abarcan una distancia muy larga y se necesita tener continuidad se emplea la técnica llamada *roll along* (Figura 8) que consiste en colocar la primera línea de electrodos de medida y el carrete #1 al final del perfil obteniendo así una nueva combinación.

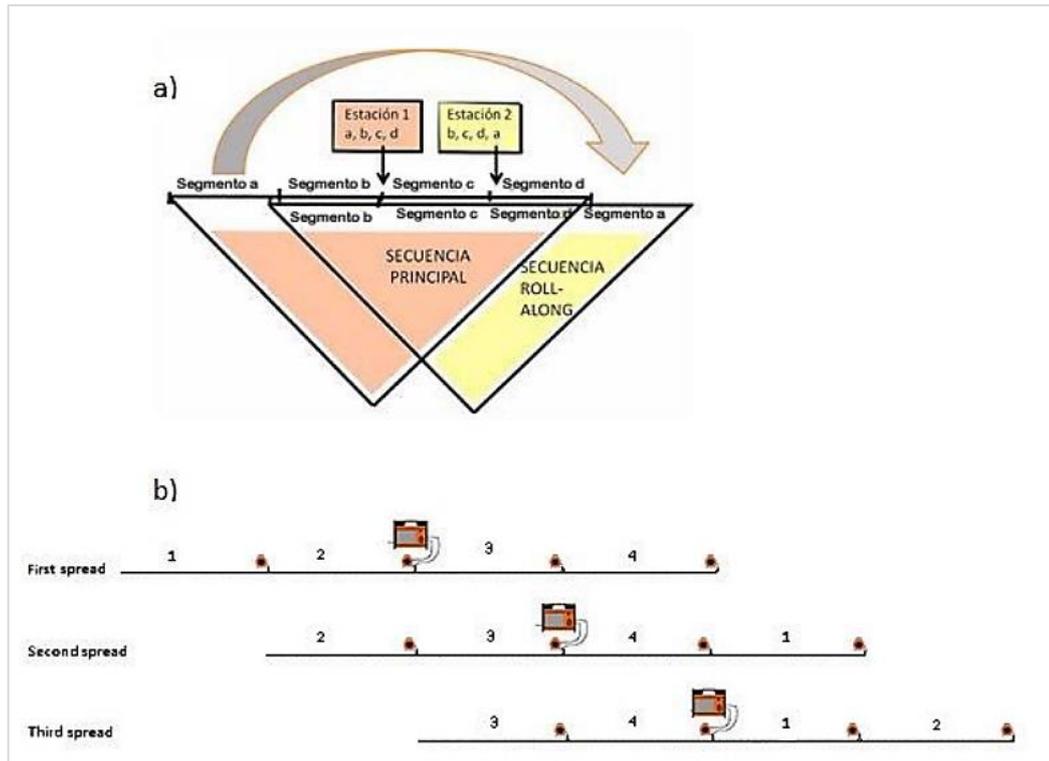


Figura 8. a) Esquema de la técnica roll along. b) Combinaciones de varios roll-along para la continuidad de un mismo perfil.
Fuente: Hidroingeniería S.A.S

3.2.1.2 Ensayo de Microgravimetría.

Las medidas gravimétricas se realizaron con el gravímetro Scintrex Autograv modelo CG-5 que tiene un rango de medida de más de 8000 mGal y una precisión de lectura de 0,001 mGal (Scintrex, 2006).

En el presente estudio se realizó medidas gravimétricas de tres perfiles, dos en sentido longitudinal al deslizamiento (S-N) y un perfil en sentido perpendicular (W-E) con un espaciamiento de 10m entre cada estación. Para la toma de datos se utilizó el método de ciclo de medidas, el cual consiste en partir de un punto base cuya gravedad absoluta es conocida para después realizar las siguientes medidas de las demás estaciones y al final volver a tomar el punto base cerrando de esta manera un ciclo. Es decir cada vez que se abra un nuevo ciclo se debe partir y finalizar en la base conocida controlando así la deriva instrumental.

La base gravimétrica fue tomada en la Universidad Técnica Particular de Loja (Foto 2) situada debajo del monumento de la cruz la cual fue establecida a partir de la base de Granada (España) del Instituto Geográfico Nacional en el año 2010 (Tabla 6).

Tabla 6. Coordenadas Geográficas de la base gravimétrica.

| Coordenadas UTM (WGS84 Zona 17S) | |
|---|-------------|
| Norte (m) | 9559090 |
| Este (m) | 699912 |
| Altura (m) | 2110,50 |
| Gravedad Abs mGal) | 9774332.010 |

Elaboración: Tamay, 2015



Foto 2. Estación Base UTPL.
Fuente: La Autora.

Con el gravímetro se obtuvo medidas de la gravedad, tiempo, error, desviación estándar (SD) a las cuales se les aplica las correcciones necesarias para finalmente obtener la anomalía de Bouguer. El tiempo aproximado de cada medida fue de tres y cinco minutos y debe descartarse variaciones excesivas en comparación con las medidas anteriores. Se debe considerar el rango de error y la desviación estándar con la finalidad de obtener los mejores resultados posibles.



Foto 3. Toma de datos gravimétricos.
Fuente: La Autora.

Para determinar las coordenadas de la ubicación de las estaciones gravimétricas (x, y, z) se utilizó el DGPS (Differential GPS) marca Trimble R6 de precisión milimétrica con una máscara de elevación de 10°. El equipo empleado para la toma de datos fue:

- Dos receptores con GPS integrado y antenas de precisión
- Teclado de mano con conexión bluetooth hacia los receptores.
- Bastón para el receptor móvil
- Un bípode
- Un trípode para la base
- Dos baterías
- Una batería externa de 12V
- Un cable para la conexión de la base y la batería externa.

Se realizó la instalación de uno de los receptores sobre el punto de coordenadas conocidas (Tabla 7) denominado como estación base ubicado en la ciudad de Malacatos (Foto 4). Se trabajó con un receptor fijo denominado Base el cual transmite correcciones por radio a un receptor móvil llamado también rover con el cual se va tomando las mediciones.

Tabla 7. Coordenadas Geográficas de la Estación Topográfica.

| Coordenadas UTM (WGS84 17S) | |
|-----------------------------|--------------|
| Norte | 9533530, 805 |
| Este | 693295,463 |
| Altura elipsoidal | 1505,277 |

Fuente: Elizalde, 2015

Una vez realizados todos los ajustes, conexiones y haber asignado la función de cada receptor, en el menú principal de Trimble Survey Controller se configura un estilo de levantamiento determinado para poder iniciar con el trabajo. Para este caso se configuró el estilo *RTK* (levantamiento diferencial en tiempo real) que tiene un radio de alcance de 10 km desde la estación base y cada medición tarda 3s. Se configuró con almacenaje automático de los datos.

En zonas donde la irregularidad de la topografía y por la presencia de arbustos que impedían la buena señal del receptor base se procedió a tomar las medidas en estilo *Fast Static* la misma que con la ayuda de un bípode se tomó la medida con una duración de 5 minutos.



Foto 4. Estación base topográfica Malacatos.
Fuente: La Autora.

3.2.2 Geología.

El levantamiento de datos geológico – estructural consiste en la descripción de los principales afloramientos en la zona de estudio sean estos taludes de vías o afloramientos naturales a través de caminos principales, secundarios, senderos, quebradas, ríos, e incluso canales con la finalidad de obtener información sobre la litología del sector y la disposición de los materiales sedimentarios.

Todas las observaciones y medidas deben detallarse, describirse y ser identificadas mediante fotografías, para que la información pueda ser posteriormente analizada en el trabajo de gabinete. Además los datos tomados de los afloramientos comprenden su potencia, datos estructurales, composición litológica, orientación y ubicación mediante coordenadas con el GPS tomadas en el sistema WGS 84.



Foto 5. Levantamientos de datos estructurales.
Fuente: La Autora.

Con los datos obtenidos se procede a correlacionarlas con las respectivas formaciones geológicas para la elaboración del mapa geológico que represente la zona de estudio. Esto permite una mejor interpretación en la obtención de resultados conjuntamente con la información obtenida de los perfiles gravimétricos y ERT.

3.2.3 Caracterización del deslizamiento.

En la caracterización del deslizamiento se adquiere toda la información posible sobre las características topográficas, geológicas, geotécnicas con las cuales se puedan realizar un análisis de los problemas que representa dicho movimiento de masa para la población. Es necesario determinar los parámetros básicos que afectan la estabilidad del terreno y caracterizarlos completamente. Se realiza un reconocimiento del área donde se ubica el movimiento de masa, examinando varios aspectos como las dimensiones del movimiento, los

planos de falla. Se analiza las propiedades y características del material, así como la identificación de los elementos condicionantes y desencadenantes del movimiento.

Una vez en el campo es importante tomar nota de todas las observaciones como la altura del escarpe, grietas, levantamientos de material, afloramientos de agua sean estos naturales o artificiales. También se indica los lugares donde los movimientos son más visibles si se trata de vías pavimentadas, en cuanto a casas, árboles, cercas, zanjas que puedan presentar indicios de inclinación, grietas o levantamientos. Esta inclinación puede ayudar a determinar el tipo de movimiento y su dirección. Se debe tomar en cuenta los patrones de drenaje, marcas de erosiones, cambios o alineaciones en la vegetación, niveles freáticos, pozas de agua. Se debe tomar en cuenta toda la información observada puesto que en algún momento la información que parece irrelevante resulta ser muy importante para la toma de decisiones y la conceptualización del deslizamiento.

Los ensayos geofísicos son otra forma de obtener información acerca del deslizamiento puesto que nos ayudan a determinar las características de los perfiles del subsuelo, niveles de agua, litología. Motivo por el cual para el presente estudio se ha realizado una combinación de dos métodos el gravimétrico y tomografía eléctrica.

3.3 Trabajo de laboratorio

3.3.1 Método del picnómetro.

Se realizó un muestreo in situ tomando diferentes muestras representativas del área de estudio (Tabla 8), los cuales fueron almacenadas y etiquetadas para su posterior análisis en el laboratorio con la finalidad de obtener el peso específico mediante el método del picnómetro.

Tabla 8. Coordenadas Geográficas de la toma de muestras.

| Código Muestra | Coordenadas WGS84 Zona 17S |
|-----------------------|---------------------------------------|
| M1 | X: 695679 Y: 9534190 Z:1527 |
| M2.1 - M2.2 | X: 694923 Y: 9534578 Z:1584 |
| M3.1 - M3.2-M3.3 | X:696012 Y:953454 Y:1558 |

Fuente y Elaboración: La Autora.

Se realizó tres ensayos de cada muestra y así obtener un promedio. El procedimiento a seguir es:

- a) Se pesa el picnómetro vacío completamente seco. (P1)
- b) Se pesa el picnómetro más muestra. (P2)
- c) Se afora con agua, se seca lo excesos y se lo pesa. (P4)
- d) Se pesa el picnómetro solo con agua. (P3)

$$P_e = \frac{P_2 - P_1}{(P_3 - P_1) - (P_4 - P_2)} \quad (3.1)$$



Foto 6. Materiales usados en el método del picnómetro.
Fuente: La Autora.

3.4 Trabajo de Gabinete

El trabajo de gabinete consiste en la preparación y procesamiento de los datos obtenidos en el campo mediante el uso de diferentes programas especializados que cumplan con la finalidad del trabajo que se desea obtener. Se inicia con la interpretación de la geología del sector para la generación del mapa geológico. El procesamiento de datos de las campañas gravimétricas son analizados conjuntamente con los datos obtenidos del DGPS generando los modelos y mapas gravimétricos a partir de correcciones realizadas como la deriva instrumental, eliminación del efecto de marea, corrección topográfica, de aire libre y Bouguer; con ayuda de los programas como CICLOS, ANOMALIA, PERFIL, GRAVMASTER, GLOBAL MAPPER, GRAVMAG, SURFER.

Para el ensayo de ERT, mediante el programa SAS 4000 ABEM se realiza la descarga de los datos los cuales tienen extensión .s4k y se los convierte a la extensión .dat. La construcción de modelos se realiza mediante el proceso de inversión de cada perfil geo-eléctrico con el programa RES2DINV con el cual se obtiene un modelo de resistividad real del terreno a partir

de pseudosecciones de resistividades aparentes. El programa permite visualizar las medidas con la finalidad de realizar una depuración de datos, eliminando valores erróneos. Las etapas realizadas durante el procesamiento de datos se detallan en la Tabla 9.

Tabla 9. Softwares utilizados durante el procesamiento de datos.

| ETAPA | | FINALIDAD | PROGRAMAS |
|---|--|--|----------------------|
| Geología | | Realizar el mapa geológico digital a partir de los datos de campo. | ArcGis 9.3, Excel |
| Geofísica | Gravimetría | Manipular y editar datos obtenidos en el campo de las campañas gravimétricas. | UltraEdit v14, excel |
| | | Corregir la deriva instrumental y eliminación del efecto de las mareas. | Ciclos |
| | | Realizar la corrección del aire libre, corrección de Bouguer y cálculo de la anomalía de Bouguer. | Anomalía |
| | | Generar el modelo digital de terreno con extensión .xyz | Global Mapper V 18 |
| | | Realizar la corrección topográfica mediante el método gráfico de los círculos de Hammer. | Demo GravMaster |
| | | Proyectar los datos de las anomalías de Bouguer para cada estación gravimétrica de medida sobre un perfil. | Perfil 11.exe |
| | | Graficar los perfiles en dos dimensiones, obteniendo como resultado la anomalía residual real u observada y la anomalía residual teórica o calculada. Las mismas que deben ajustarse considerando la geología, contactos, densidades y fallas. | GravMag 32 |
| | Elaborar el mapa de anomalía de Bouguer. | Surfer v12 | |
| | ERT | Descarga y conversión de datos de las resistividades del suelo obtenidas en campo. | SAS 4000 ABEM |
| | | Generar modelos en 2D mediante el proceso de inversión con el cual se obtiene un modelo de resistividad real del terreno a partir de pseudosecciones de resistividades aparentes. | RES2DINV |
| Manipular y editar datos necesarios para la topografía de los perfiles de resistividad. | | UltraEdit, Bloc de notas, Excel | |
| Informe final y mapas | | Digitalizar la información obtenida y elaboración de mapas. | Word, Excel, ArcMap. |

Elaboración: La Autora.

CAPÍTULO IV

INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

4.1 Geología Local

La cuenca de Malacatos se asienta sobre un basamento metamórfico y/o volcánico de edad paleozoica sobre la cual discordantemente se encuentra las formaciones sedimentarias más jóvenes de edad miocénica como la Formación San José, Santo Domingo.

Acorde con el registro del levantamiento geológico realizado en el área se puede evidenciar la presencia de la Formación San José, Santo Domingo y finalmente material coluvio aluvial (Figura 9).

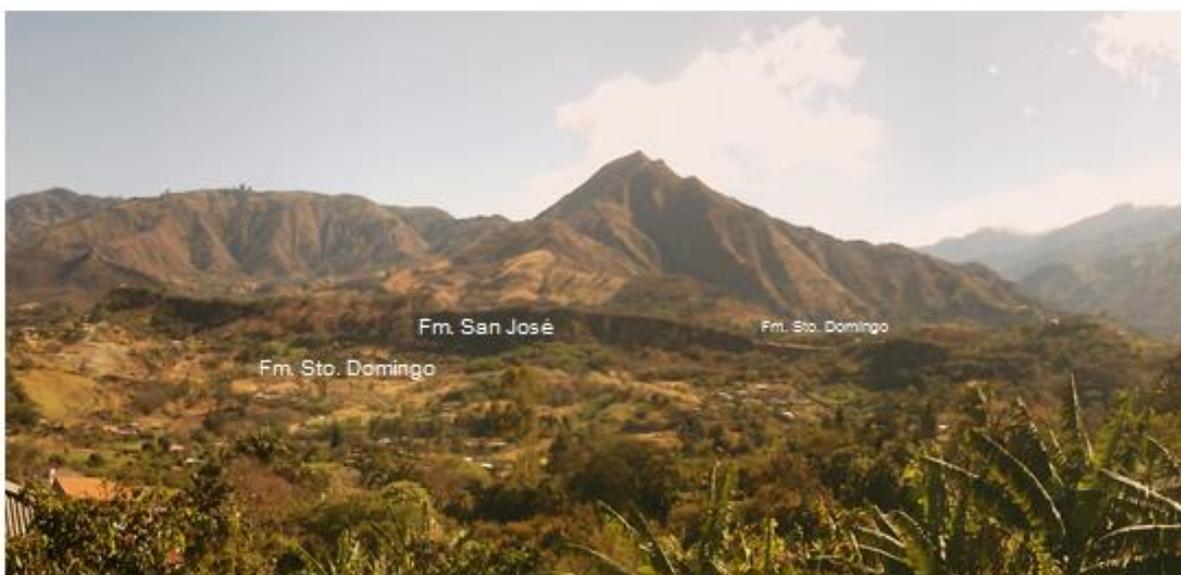


Foto 7. Foto panorámica tomada desde Taxiche alto.
Fuente: La Autora.

4.1.1 Formación San José (Mioceno Medio).

La Formación San José aflora en una franja con dirección NW – SE en el bloque denominado La Granja, en la vía Loja – Malacatos. Comprende intercalaciones de rocas detríticas como areniscas calcáreas de grano medio los cuales mineralógicamente contiene cantidades de mica, feldspatos, plagioclasa, cuarzo. Existen estratos de brechas y tobas que por acción a los procesos de intemperismo poseen una coloración verdosa (Foto 8).

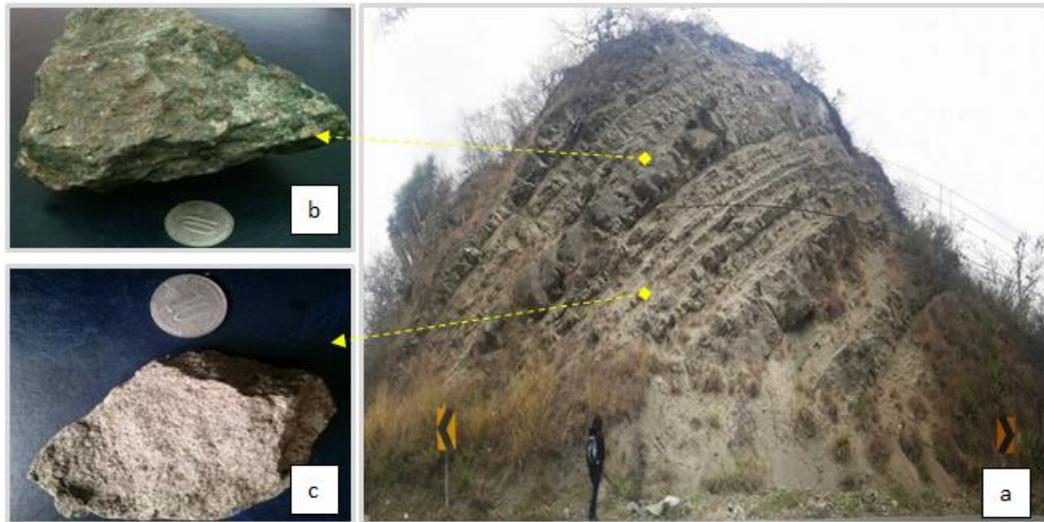


Foto 8. a) Formación San José – Vía Loja Malacatos. a) Brechas meteorizadas.
 c) Areniscas calcáreas.
 Fuente: La autora.

En las coordenadas X= 695982, Y= 9534244 aflora intercalaciones de areniscas calcáreas muy compactas que va en tonalidades gris a verde claro y margas con alto contenido de carbonatos (Foto 9).

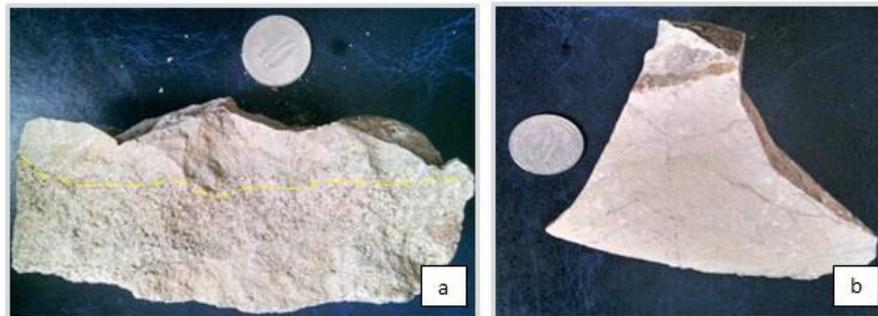


Foto 9. a) Intercalación de arenisca calcárea compacta con margas calcáreas. b) Marga calcárea – Formación San José.
 Fuente: La autora.

Al norte de la formación San José (X= 695976, Y= 9534730) se observa tobas muy meteorizadas con una coloración verdosa y depósitos de areniscas meteorizadas cubiertas de manera superficial por carbonatos (Foto 10c). Además, observa vetillas de aproximadamente 1 cm de espesor de material calcáreo-caliza (Foto 10a-10b).



Foto 10. Formación San José. a) Vetillas. b) Material calcáreo de procedente de las vetillas. c) Areniscas cubiertas superficialmente por carbonatos.
Fuente: La Autora.

En las coordenadas X= 695028; Y= 9535033 afloran areniscas calcáreas con alto grado de meteorización que van en tonalidades grisáceas a verde (Foto 11a). Hacia el techo se observa micro- conglomerado con clastos metamórficos y volcánicos de tamaño centimétrico con clastos subredondeados a redondeados en una matriz arenosa calcárea (Foto 11b).



Foto 11. a) Arenisca calcárea altamente meteorizada. b) Micro - conglomerado englobado en una matriz arenosa calcárea.
Fuente: La Autora.

De los datos estructurales obtenidos en los afloramientos de la formación San José, se tienen rumbos desde N37°W, N27°W, N65°W con buzamientos variados desde 43°, 39°, 55° NE respectivamente.

4.1.2 Formación Santo Domingo.

Constituye la secuencia media del relleno sedimentario de la cuenca de Malacatos, al norte del polígono de estudio ($X= 695956$, $Y= 9534890$) se puede encontrar intercalaciones de lutitas color café a marrón que presentan laminación fina (Foto 12a), intercalados con limolita de color amarillento y limos blanquecinos (Foto 12b). Presenta intercalaciones delgadas de arenisca con coloración café clara.



Foto 12. a) Intercalación de lutitas color marrón con areniscas.
b) Intercalación de limos y limolita.
Fuente: La Autora.

Las vetillas de yeso se disponen de manera sub- horizontal a la estratificación, de forma oblicua y siguiendo planos de rotura, el cual es translúcido, blanquesino con estructura columnar, fibroso (Foto 13a, 13b). Se presenta en potencias muy variadas desde 0.5 cm hasta 1 cm. Se encuentra con finas capas de carbón con espesor de 0,5 cm.

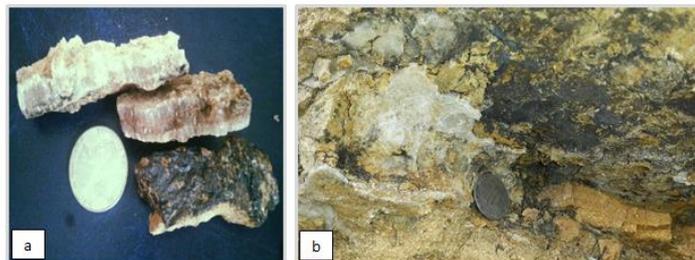


Foto 13. a) Muestra de mano de yeso y arenisca cubierta superficialmente con carbón. b) Presencia in situ de carbón con yeso y azufre.
Fuente: La Autora.

En las coordenadas $X= 694995$, $Y= 9534556$ se observa arcillas de coloración crema a gris claro. Se presenta lutitas de coloración café completamente meteorizadas con finas vetillas de yeso de espesores milimétricos. En los afloramientos generalmente se observa acumulaciones superficiales de carbonatos (Foto 14).



Foto 14. Arcillas coloración crema a gris clara.
Acumulación superficial de carbonatos.
Fuente: La Autora.

En la zona sur del polígono se observa un cambio en la coloración de la arcilla, pasando de una gris claro a un café oscuro – rojizo altamente meteorizada, fracturada y saturada puesto que conforman la mayor parte del deslizamiento. En algunas zonas cerca de la vía principal Loja - Malacatos en el sector El Sauce se observa lutitas meteorizadas de coloración amarilla clara a gris, las cuales localmente presentan oxidaciones que les otorga una coloración anaranjada. Se presentan vetillas de cuarzo aproximadamente de 0.5 cm de espesor.



Foto 15. Intercalación de lutitas meteorizadas con arenisca y arcilla.
Fuente: La Autora.

En las coordenadas X= 694666, Y= 9534204 se observa un cambio en el rumbo siendo de N40°W con un buzamiento de 50° SW conformado por lutitas de coloración amarillenta con intercalaciones de arenisca de coloración amarilla clara (Foto 15).

De los datos estructurales obtenidos en los afloramientos de la Formación Santo Domingo se tienen rumbos de N60°W, N45°W con buzamientos de 15° y 33° NE respectivamente.

4.1.3 Coluviales (Cuaternario).

Se distinguen acumulaciones de material en las zonas de menor pendiente del polígono caracterizándose por su diversidad de tamaño, los cuales como producto de la desintegración in situ de las rocas ubicadas en laderas altas y por acción de la gravedad fueron transportados. Se encuentra principalmente compuestos por bloques subangulosos a subredondeados de areniscas calcáreas y tobas meteorizadas que varían desde tamaños decimétricos a métricos, distribuidos en forma caótica y mal clasificada. El material tiene una consolidación pobre, englobados en una matriz de arcilla y materia orgánica (Foto 16).

El material coluvial procede de la formación San José cubriendo superficialmente en parte a la Formación Santo Domingo.



Foto 16. Material coluvial ubicado al Suroeste y centro del polígono.
Fuente: La Autora.

4.1.4 Terrazas Aluviales (Cuaternario).

Las terrazas aluviales son depósitos sedimentarios en zonas donde las pendientes del terreno disminuyen siendo estas generalmente planas y en los laterales del cauce de los ríos o quebradas o como resultado del transporte por medio de las corrientes de agua.

Estos depósitos están formados por arenas, gravas gruesas con cantos sub- redondeados de tamaño centimétrico a decimétrico, compuestos por una matriz limo-arcillosa, de coloración crema, café claro. La redondez de las gravas indica la larga distancia de su recorrido. Las terrazas se encuentran a lo largo del río Malacatos (Foto 17). Se observan terrazas de menor tamaño a lo largo de la quebrada Pilaraca, ubicada al Noreste del polígono.



Foto 17. Material aluvial ubicado a lo largo del río Malacatos.
Fuente: La Autora.

4.1.5 Aguas Superficiales

Como resultado de las actividades agrícolas, sistemas de riego, canales de agua y condiciones climáticas se han generado acumulaciones de agua y saturación del suelo la que aumentan el flujo del agua a través del terreno generando desestabilización en los flancos del deslizamiento. Convirtiéndose el agua en un factor desencadenante del movimiento de ladera (Foto 18).



Foto 18. Medios Antrópicos causantes de la desestabilización del deslizamiento.
Fuente: La Autora.

4.2 Estructuras Tectónicas Locales

En la Formación San José (Foto 7) se ubica una estructura monoclinal, cuyos estratos presentan una disposición inclinada en una sola dirección buzando hacia el NE la misma que estaría relacionada con la tectónica del sector. En la Formación Santo Domingo se encuentran varios micropliegues como resultado de las fuerzas de compresión.

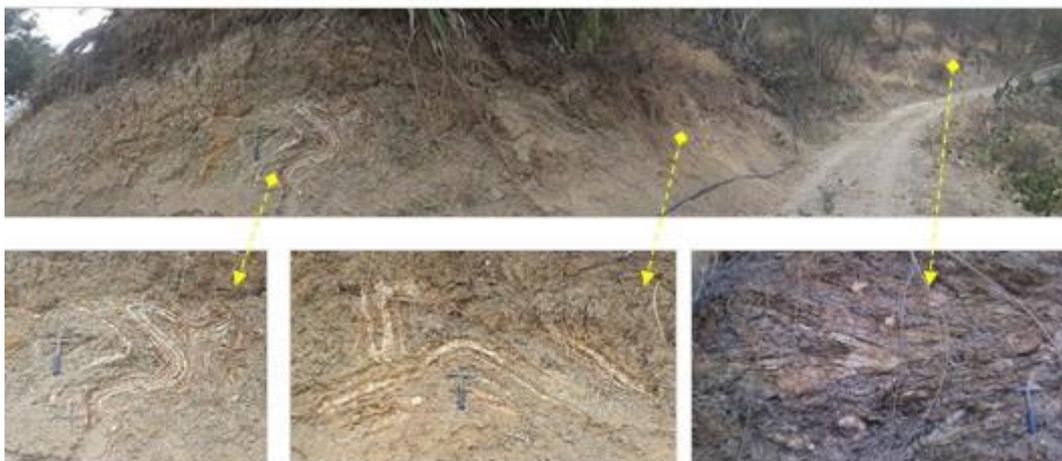


Foto 19. Micropliegues en la Formación Santo Domingo.
Fuente: La Autora.

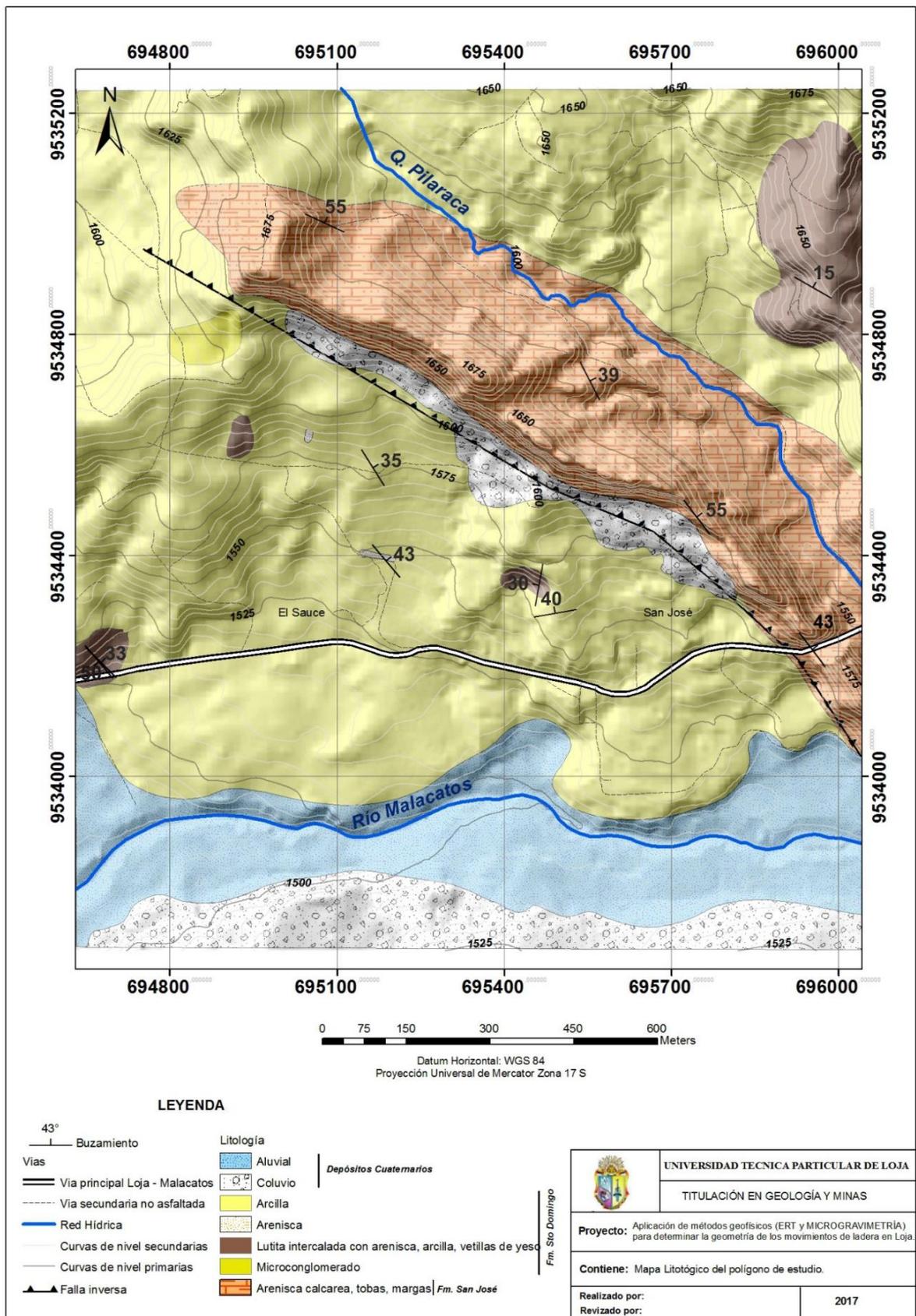


Figura 9. Mapa geológico del polígono de estudio.
Fuente y Elaboración: La Autora.

4.3 Ensayo de Tomografía Eléctrica

La campaña de Tomografía Eléctrica realizada en el área de estudio consistió en la toma de 3 perfiles geo - eléctricos distribuidos de manera paralela y perpendicular al deslizamiento (Figura 10), todos con una distancia equidistante de 5m entre cada electrodo con la configuración Dipolo – Dipolo, bajo el protocolo Dips – Dips 4L y Dips – Dips 4S. Los mismos que conjuntamente con la topografía y el programa RES2DINV se obtuvo secciones de resistividades reales del terreno a partir de pseudosecciones de resistividades aparentes de medidas en el campo. Para la interpretación de los perfiles se relacionó la geología del sector, valor de la resistividad de las diferentes litologías presentes en el área, grietas, límites del deslizamiento y zonas con presencia de agua.

En la tabla 10 se muestra un resumen con los principales parámetros usados para la configuración de cada línea de ERT tomada en situ, así como las coordenadas del punto de inicio y final expresadas en WGS 84 Zona 17S (Tabla 11) (Figura 10).

Tabla 10. Parámetros de los perfiles geo-eléctricos.

| Perfil | N° electrodos | Distancia (m) | Longitud Total (m) | Configuración | Dirección |
|-------------|---------------|---------------|--------------------|-----------------|-----------|
| Perfil A-A' | 61 | 5 | 300 | Dipolo - Dipolo | S - N |
| Perfil B-B' | 81 | 5 | 400 | Dipolo - Dipolo | S - N |
| Perfil C-C' | 141 | 5 | 700 | Dipolo - Dipolo | W - E |

Elaboracion: La Autora.

Tabla 11. Coordenadas de los perfiles de Tomografía Eléctrica.

| Perfil | Inicio | | Final | |
|-------------|--------|---------|--------|---------|
| | X | Y | X | Y |
| Perfil A-A' | 695556 | 9534484 | 695579 | 9534183 |
| Perfil B-B' | 695060 | 9534245 | 694951 | 9534609 |
| Perfil C-C' | 694955 | 9534512 | 695625 | 9534386 |

Elaboración: La Autora.

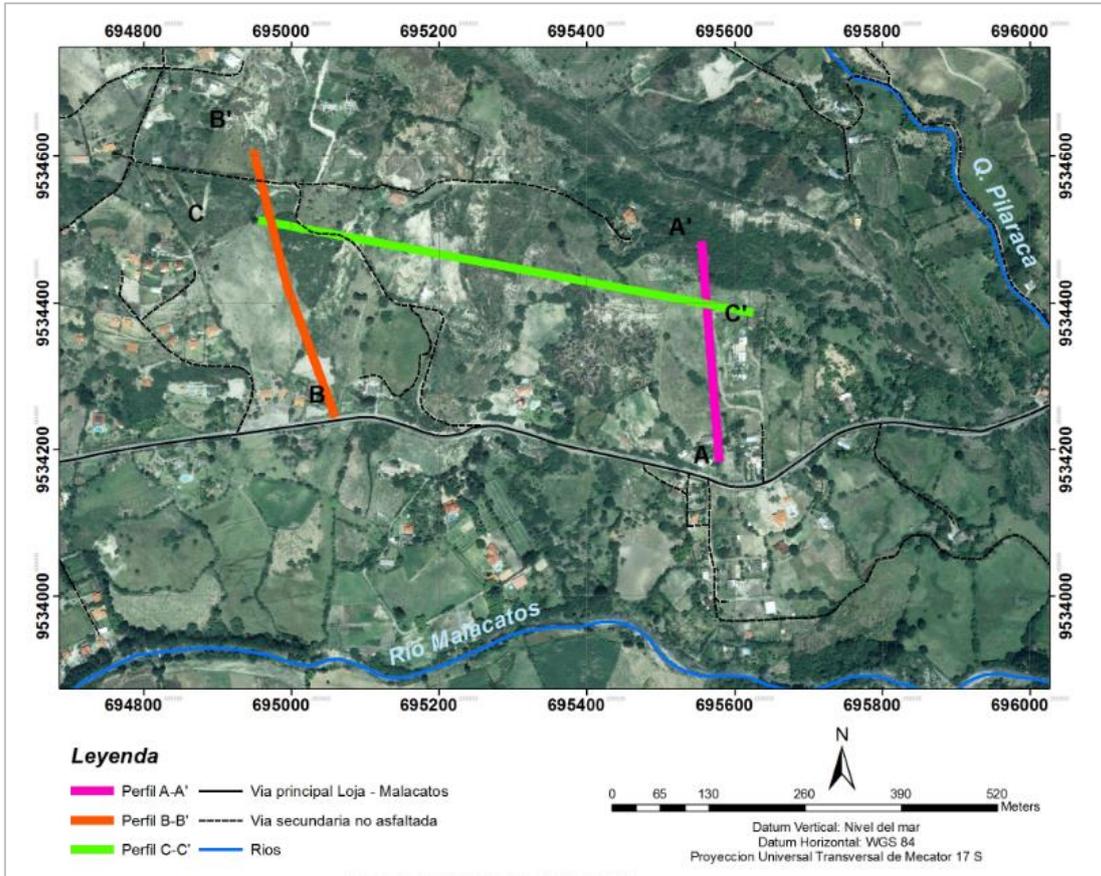


Figura 10. Ubicación de los perfiles de ERT.
Elaboración: La Autora.

4.3.1 PERFIL A – A'

El perfil está formado por 61 electrodos en total, con una separación de 5 metros obteniendo un perfil de 300 metros de longitud con una dirección S – N. En función de la resistividad se lo ha clasificado en 3 zonas.

La Zona I corresponde a las resistividades más bajas del perfil geo-eléctrico las que varían entre 0.355 a 3.11 $\Omega.m$ representando una zona sobresaturada por la infiltración de agua (canales, sistemas de riegos, captaciones, factores climáticos) del sector. De acuerdo a la caracterización geológica de la zona se trata de arcillas que al estar saturadas presentan resistividades muy bajas. La potencia de la Zona I varía entre 30 a 60 m de profundidad. Se observan bloques de roca con resistividades entre 9,21 – 27,3 $\Omega.m$ cuales pueden representar cantos de arenisca y lutita con un espesor aproximado de 20 m.

Modelo de Resistividad Eléctrica con Topografía

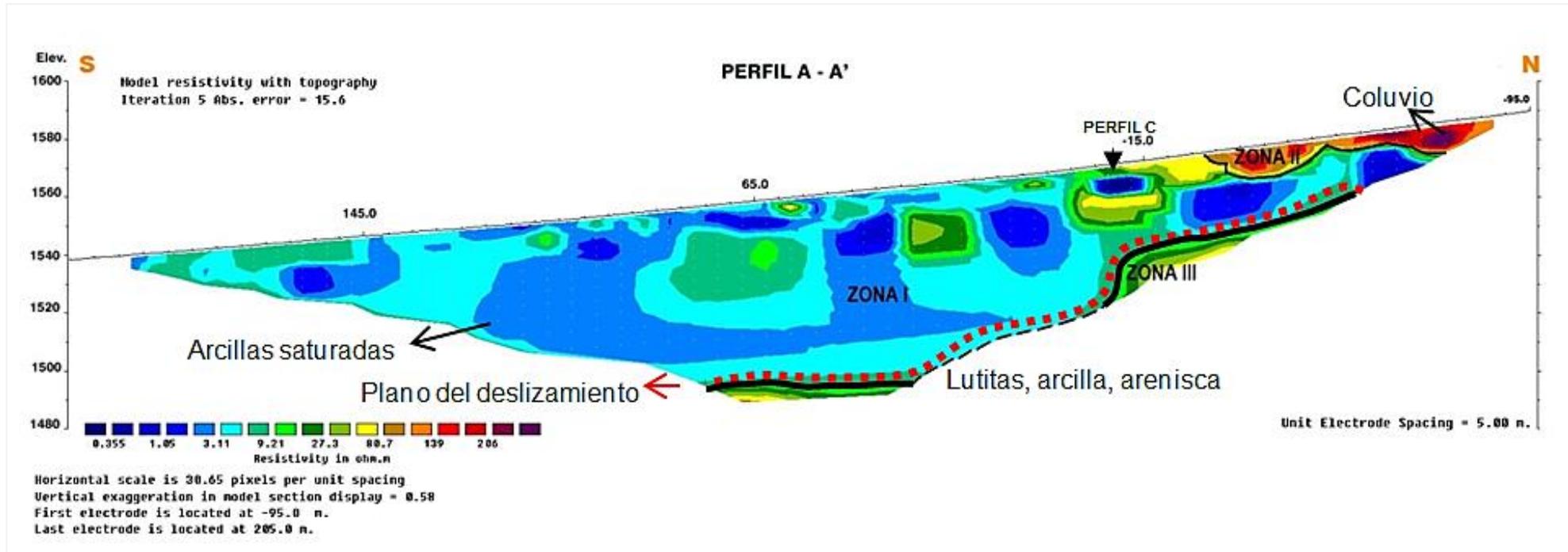


Figura 11. Resistividades eléctricas del perfil A - A'.

Elaboración: La Autora.

La Zona II representa los valores más altos de resistividad cuales corresponden a material coluvial englobado en una matriz arcillo – limosa con un espesor de 10 m, el cual como producto de la desintegración in situ de las rocas y por acción de la gravedad fueron depositados. El material coluvial proviene de la Formación San José representado por arenisca calcárea, margas, tobas.

La Zona III comprende valores de resistividad entre 9,21 – 80,7 Ω .m, acorde con la geología corresponde a lutitas, arcilla y arenisca cuales se encuentran en estado natural, es decir que la zona no se encuentra afectada por el movimiento de masa considerándose como el límite entre la roca no afectada y el plano del deslizamiento. La profundidad del paquete de rocas es desconocida.

4.3.2 Perfil B – B'

El perfil B-B' corresponde al área con mayor movimiento el cual fue tomado con dirección S – N con un total de 81 electrodos con una distancia equidistante de 5 metros obteniendo un perfil geo- eléctrico de 400 metros de longitud. En función de la resistividad se lo ha clasificado en 3 zonas.

La Zona I corresponde a arcillas saturadas presentando valores de resistividad muy bajos entre 0,417 a 5,62 Ω .m como consecuencia de la acción del agua. Se puede apreciar el plano del deslizamiento ubicado aproximadamente a 40 y 60 m de profundidad. A lo largo de la zona se observa bloques de arcilla y lutita con una resistencia comprendida entre 13,4 a 31,9 Ω .m con espesores aproximados de 5 a 10 m.

La Zona II comprende una región de transición con la Zona I, puesto que no se encuentra afectada por el movimiento del deslizamiento presentando una continuidad en el depósito de los estratos. Su resistividad varía entre 13,4 a 31,9 Ω .m, correspondiendo a lutitas, arcilla y arenisca con una potencia entre 20 y 30 metros de espesor.

La Zona III representa los valores más altos de resistividad comprendidos entre 75,8 a 181 Ω .m comprendiendo la secuencia basal sedimentaria del perfil, que corresponde a areniscas calcáreas, margas, tobas.

Modelo de Resistividad Eléctrica con Topografía

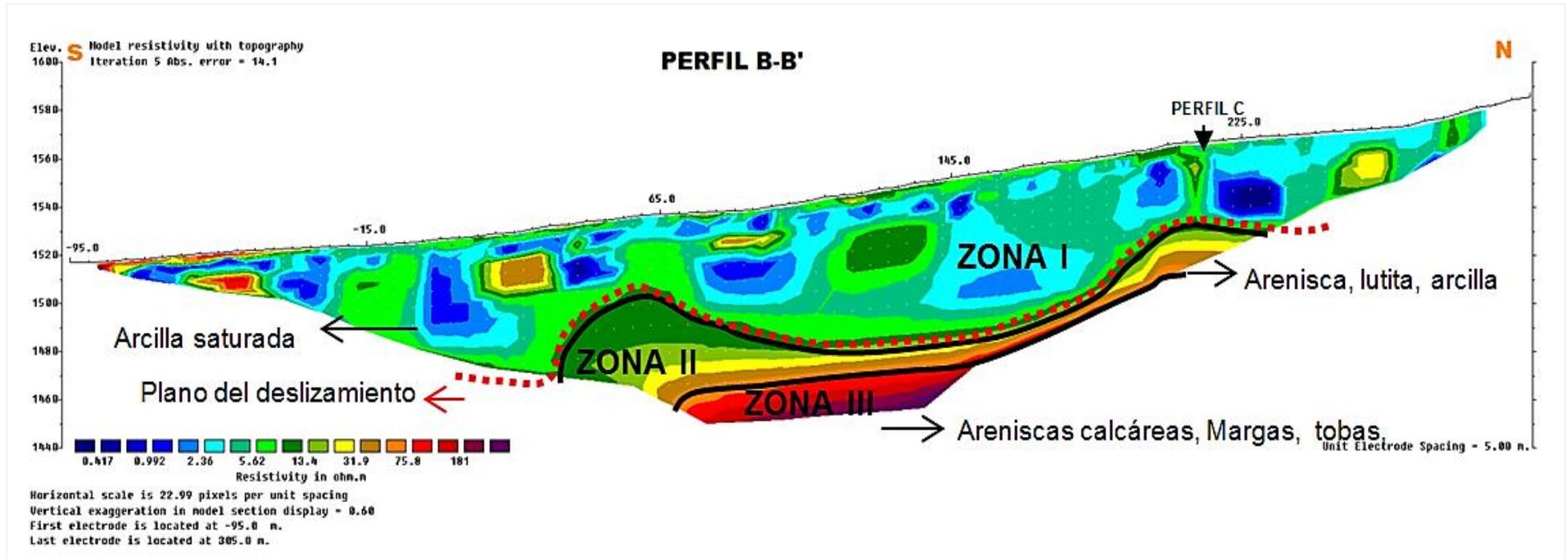


Figura 12. Resistividades eléctricas del perfil B - B'.

Elaboración: La Autora.

4.3.3 Perfil C – C'

Este perfil está formado por 141 electrodos dispuestos con orientación W – E, con una separación de 5 metros entre cada uno consiguiéndose un perfil de 700 metros de longitud. La pseudosección presenta las mismas regiones resistivas que los perfiles anteriores, siendo está dividida en 3 zonas para su respectivo análisis.

La Zona I presenta valores de resistividad muy bajos comprendidos entre 0,618 a 3,05 Ω .m cuales geológicamente corresponden a arcillas saturadas por efecto de las diferentes actividades agrícolas del sector. En la zona se observa en menor cantidad material con resistividades de 6,78 a 15,1 Ω .m que representa areniscas. La potencia de la zona afectada varía entre 50 y 60 m de profundidad donde se encuentra el plano del deslizamiento relacionándose con los perfiles descritos anteriormente.

La Zona II representa la secuencia sedimentaria menos saturada y sin alteración por el movimiento de masa, cuyos valores varían entre 15,1 a 33,4 Ω .m cuales corresponden a lutitas, arenisca y arcilla. Presenta un espesor entre 15 a 20 m. Constituye la zona de transición entre la roca sana y el área afectada por el deslizamiento (zona I).

Mediante la correlación del perfil C con el perfil A y perfil B se determinó la continuidad de la Zona II a 40 m de profundidad a partir de la intersección con los mismos tanto hacia el W como al E del perfil (líneas punteadas color negro).

La Zona III constituye a la secuencia sedimentaria basal del perfil, que corresponde a areniscas calcáreas margas, tobas, y cuyos valores de resistividad varían entre 74,3 a 165 Ω .m. Al correlacionar el perfil C con el perfil B se puede determinar la continuación de la zona hacia el W.

Modelo de Resistividad Eléctrica con Topografía

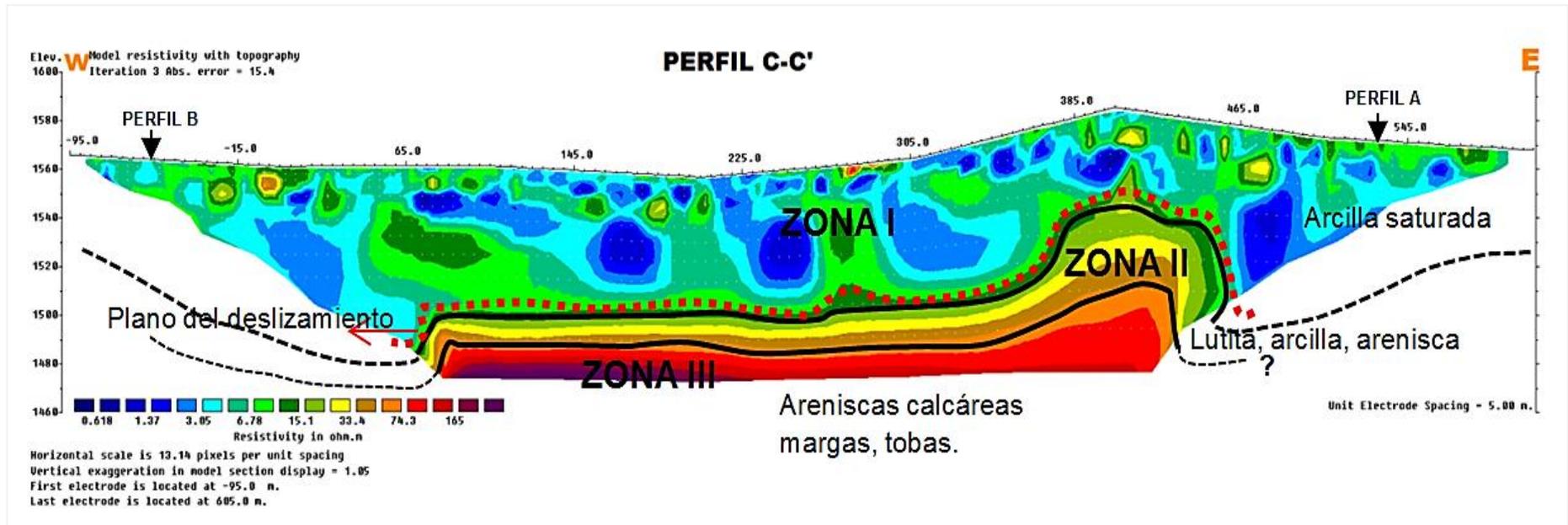


Figura 13. Resistividades eléctricas del perfil C - C'.

Elaboración: La Autora.

4.4 Ensayo de Micro-gravimetría

La campaña de Micro-gravimetría realizada en el área de estudio consistió en la toma de tres perfiles gravimétricos distribuidos de manera paralela y perpendicular al deslizamiento con un distancia de 10 metros entre cada estación de medida (Figura 14).

Para el modelamiento de los perfiles gravimétricos es importante conocer la geología del sector, información que fue brindada al realizar un mapeo geológico previo así como del valor de las densidades de los materiales en superficie que se obtuvieron a través del método del picnómetro las mismas que permiten realizar una interpretación probable de la distribución de los materiales a profundidad.

Tabla 12. Características de los perfiles gravimétricos.

| Perfil gravimétrico | N° estaciones | Distancia (m) | Dirección |
|---------------------|---------------|---------------|-----------|
| Perfil A-A' | 58 | 10 | S - N |
| Perfil B-B' | 75 | 10 | S - N |
| Perfil C-C' | 104 | 10 | W - E |

Elaboración: La Autora.

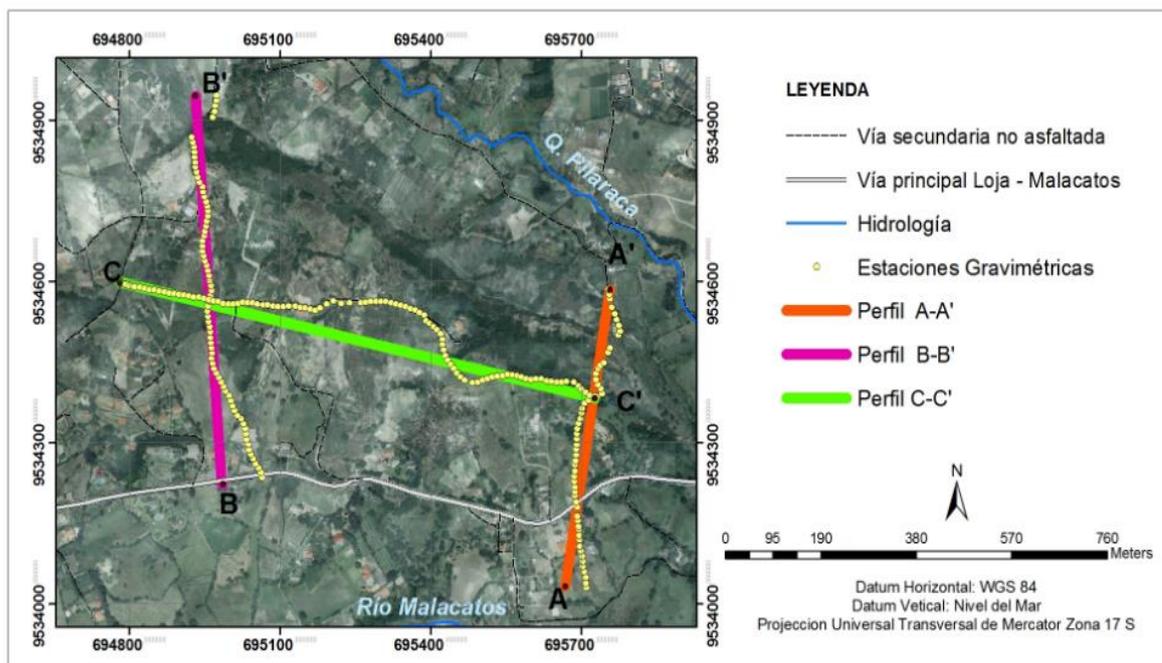


Figura 14. Ubicación de los perfiles gravimétricos en el área de estudio.

Elaboración: La Autora.

4.4.1 Perfil Gravimétrico A-A'

Ubicado al este del polígono de estudio con una orientación S – N, comprende 58 estaciones gravimétricas de medida separadas a 10 metros obteniendo como resultado aproximado un perfil de 550 metros de longitud. Topográficamente el perfil asciende alcanzado como máximo una altura de 1600 metros. El valor mínimo de la anomalía residual es de -0.9 mGal indicando el lugar más profundo. Geológicamente está formado por arcilla con una densidad de 2,15 gr/cm³ cual alcanza una potencia máxima de 80 metros de profundidad. Se relaciona con la geología del sector depósitos de lutitas y arenisca meteorizadas con una densidad de 2.2 gr/cm³ que alcanza espesores de 10 a 15 metros de profundidad. Material coluvial con una densidad de 2,4 gr/cm³ con una potencia aproximada de 10 a 15 metros proveniente de la Formación San José la misma que alcanza hasta 200 metros de profundidad con una densidad promedio de 2,6 gr/cm³. Entre las estructuras geológicas existe una falla de carácter inversa que afecta toda la secuencia sedimentaria provocando el levantamiento de la Formación San José.

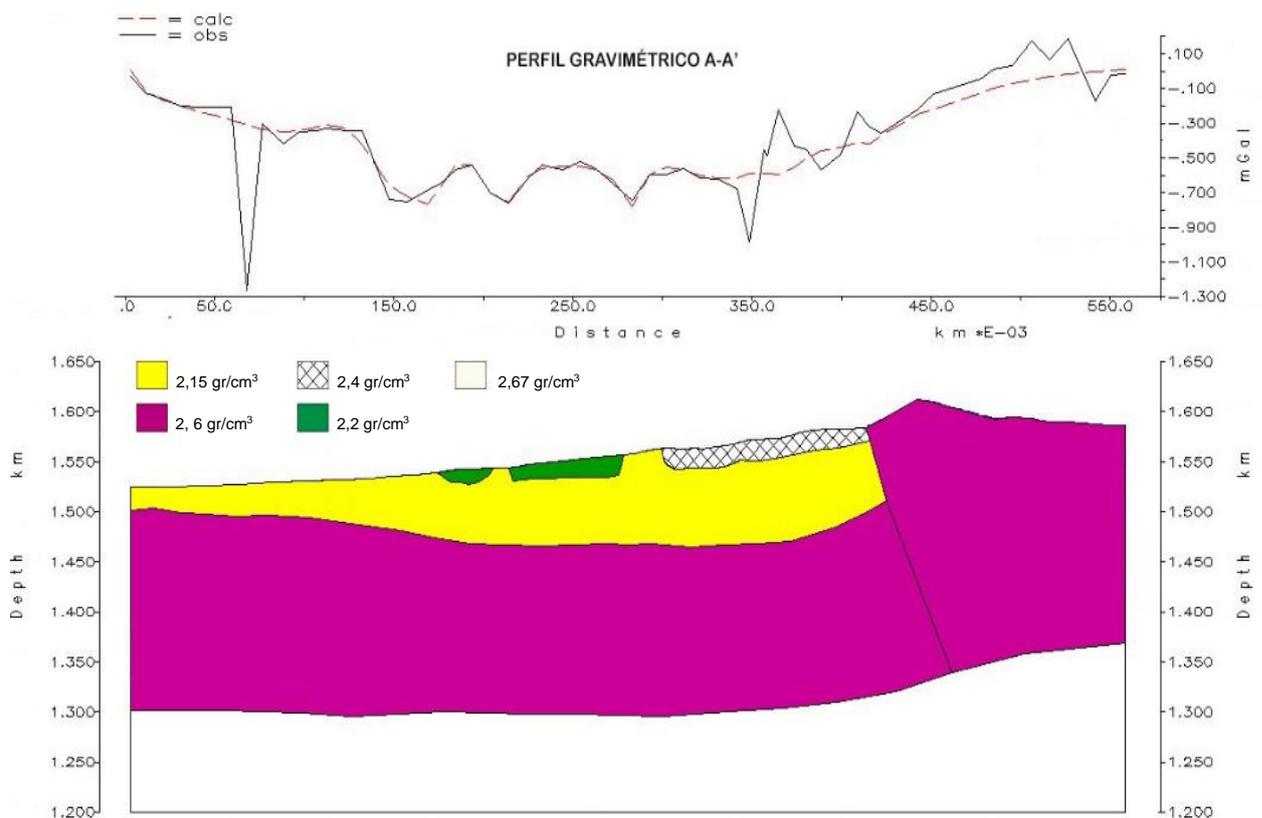


Figura 15. Modelo gravimétrico de la línea A-A'.
Fuente: La Autora.

Para el perfil geológico se han incorporado observaciones realizadas en el campo como los datos geo – estructurales descritas en el mapa geológico (Figura 9) y los resultados obtenidos del perfil de resistividad eléctrica línea A-A' (Figura 11).

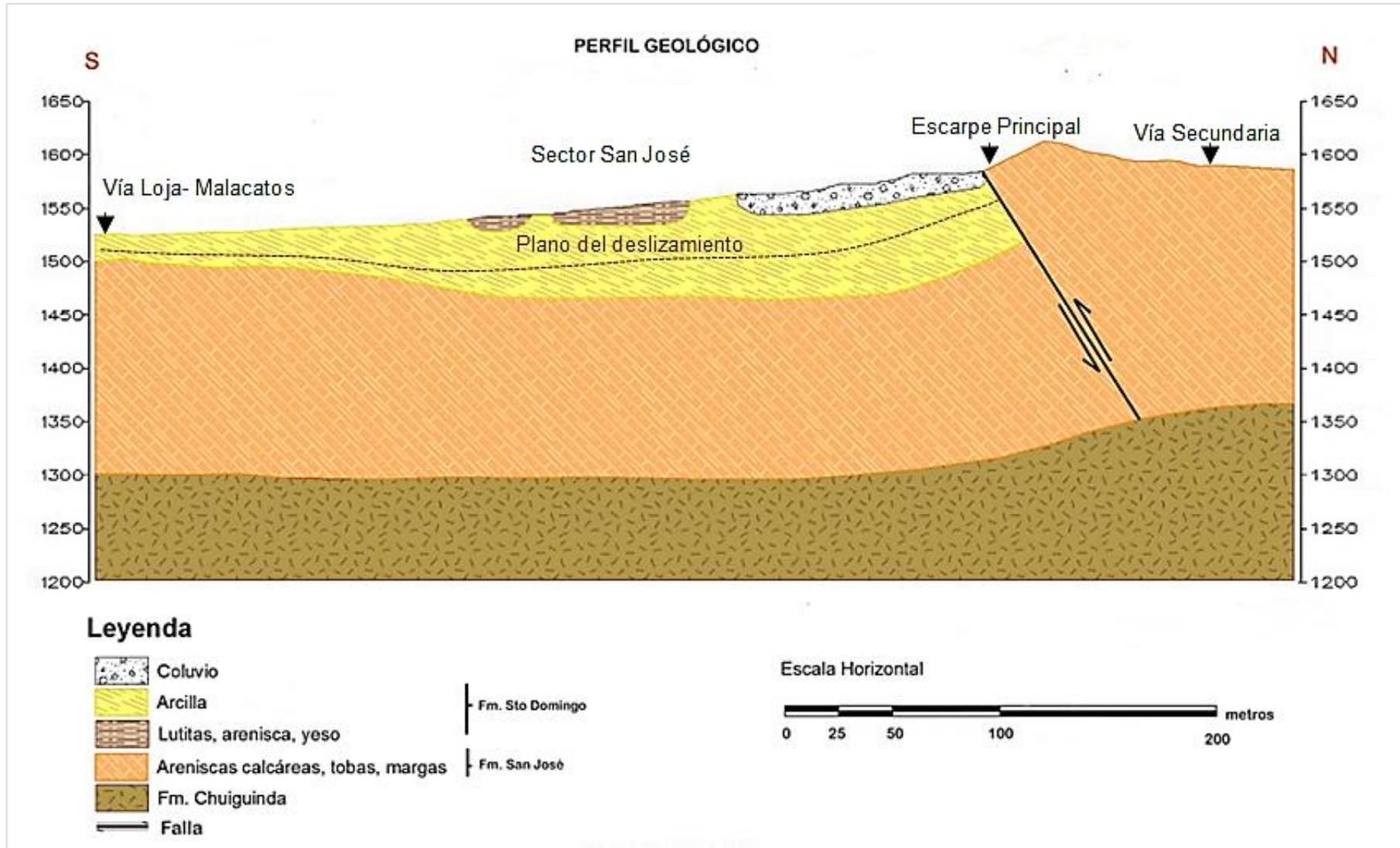


Figura 16. Correlación geológica del perfil A-A'.
Elaboración: La Autora.

4.4.2 Perfil Gravimétrico B – B'

Situado al oeste del polígono con una orientación S-N con 75 estaciones gravimétricas obteniendo un perfil aproximado de 720 metros de longitud. Topográficamente el perfil asciende alcanzando una altura de 1680 metros. El valor mínimo de la anomalía residual es de -2.00 mgal indicando la zona con mayor profundidad. Geológicamente existen depósitos en superficie de lutitas intercaladas con arenisca y vetillas de yeso con una potencia entre 15 a 20 metros de profundidad cuales se encuentran meteorizadas con una densidad de 2,2 gr/cm³. La densidad 2,15 gr/cm³ y 1,9 gr/cm³ corresponde a las arcillas de la Formación Santo Domingo la cual disminuye su espesor hacia el Sur y alcanza una profundidad máxima de 100 metros. El área con una densidad de 1,9 gr/cm³ a la vez forma parte de los deslizamientos activos DZ-3 y DZ-4 presentes en la figura 21. Se ha determinado una densidad media de 2,6 gr/cm³ para las rocas de la formación San José y finalmente para el basamento metamórfico una densidad teórica de 2,67 gr/cm³. Conforme a la geología estructural existe una falla de carácter inverso que afecta a la secuencia sedimentaria en la zona, falla obtenida también en el modelamiento de la línea A-A'.

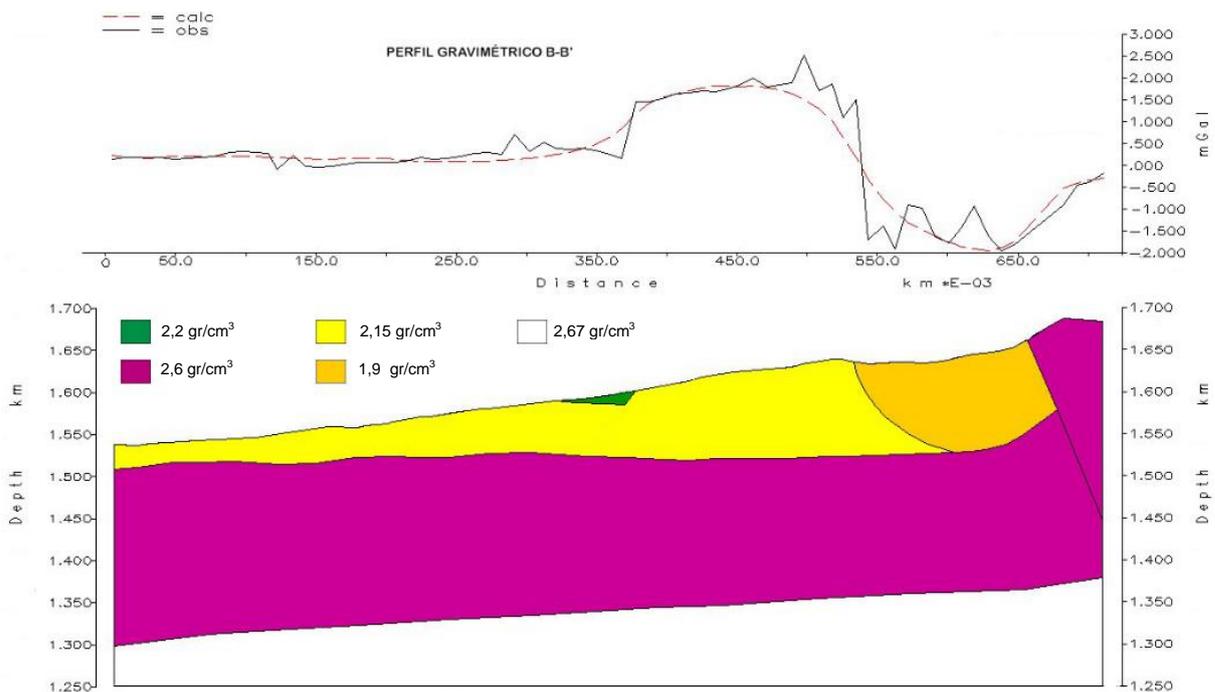


Figura 17. Modelo gravimétrico del perfil B-B'.
Elaboración: La Autora.

Para el perfil geológico se han incorporado observaciones realizadas en el campo como los datos geo – estructurales descritas en el mapa geológico (Figura 9) y los resultados obtenidos del perfil de resistividad eléctrica línea B-B' (Figura 12).

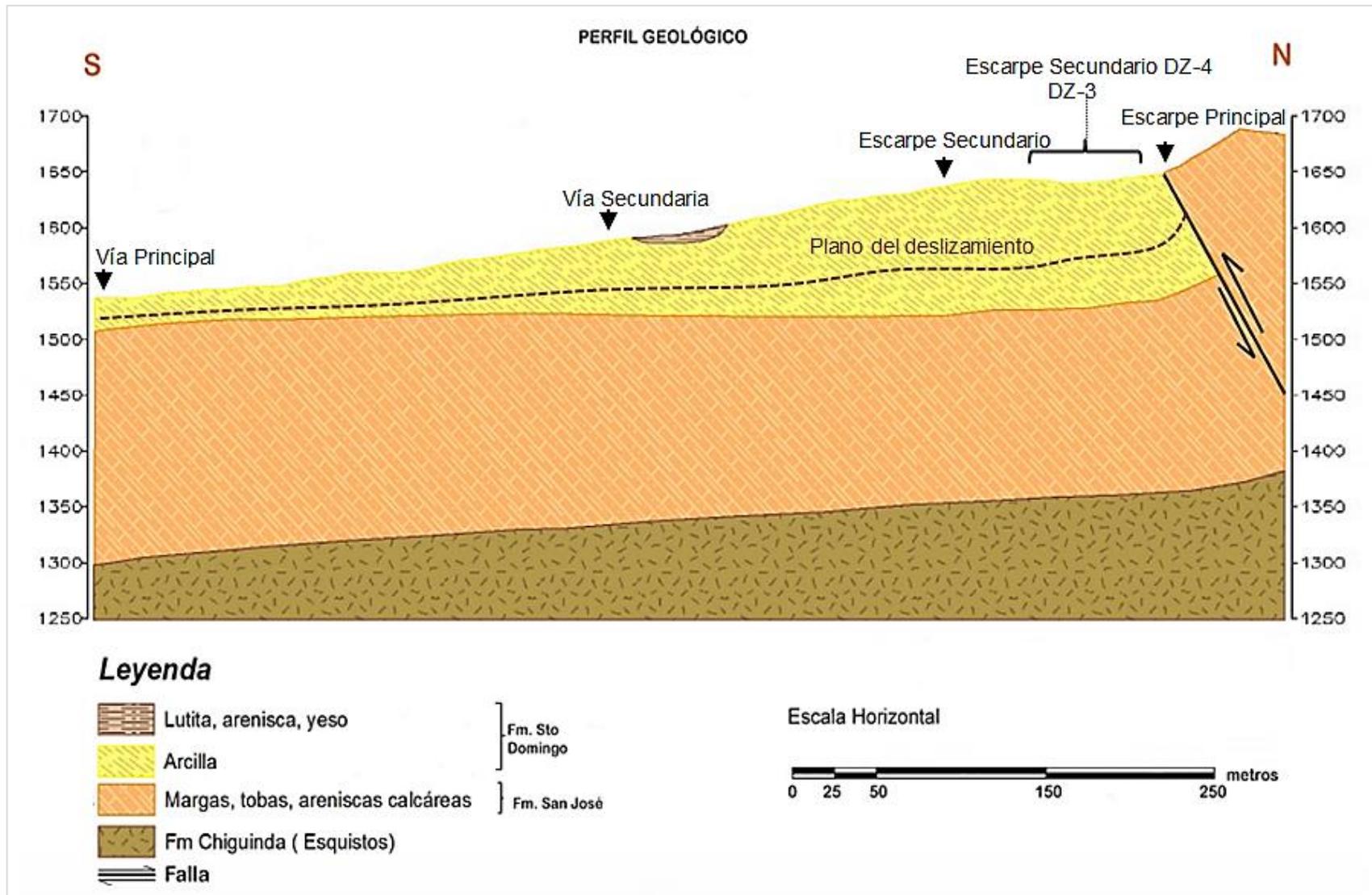


Figura 18. Perfil Geológico de la línea B-B'.
Elaboración: La Autora.

4.4.3 Perfil Gravimétrico C - C'

Línea perpendicular al movimiento del deslizamiento, ubicada al oeste del polígono. Presenta una orientación W-E con un total de 104 estaciones gravimétricas con una separación de 10 metros cada una obteniendo como resultado un perfil aproximado de 960 metros de longitud. En el perfil gravimétrico se observa ascensos y descensos de la anomalía producida por el contacto entre cuerpo de diferentes densidades obteniendo una anomalía residual máxima de 2.2 mgal y una mínima de -0.2 mgal. La cual en relación con la geología del sector y con el resultado del ensayo de ERT representa depósitos de lutitas y arenisca con una densidad de 2,2 gr/cm³ con profundidades aproximadas de 20 a 30 metros. La región con densidad 2.15 gr/cm³ constituye geológicamente arcillas de la Formación Santo Domingo las cuales en la parte Oeste alcanza una mayor profundidad de 100 metros y se reduce a 80 metros hacia el Este. El basamento sedimentario corresponde a la Formación San José la cual exhibe una densidad promedio de 2,6 gr/cm³ alcanzando un espesor de 200 metros. El coluvio hacia el Este del perfil alcanza espesores entre 15 a 20 metros representados con una densidad de 2,45 y 2,5 gr/cm³. Finalmente el basamento metamórfico perteneciente a la Formación Chiguinda tiene una densidad de 2,67 gr/cm³.

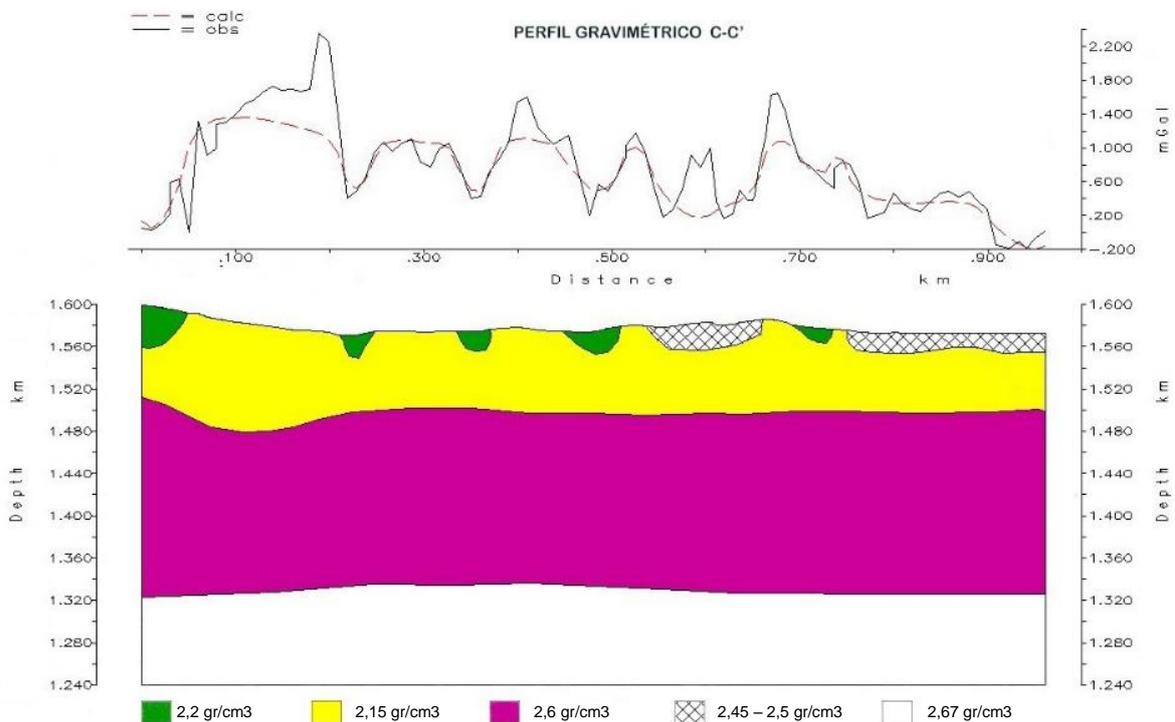


Figura 19. Modelo gravimétrico de la línea C-C'.
Fuente: La Autora.

Para el perfil geológico se han incorporado observaciones realizadas en el campo como los datos geo – estructurales descritas en el mapa geológico (Figura 9) y los resultados obtenidos del perfil de resistividad eléctrica línea C-C' (Figura 13).

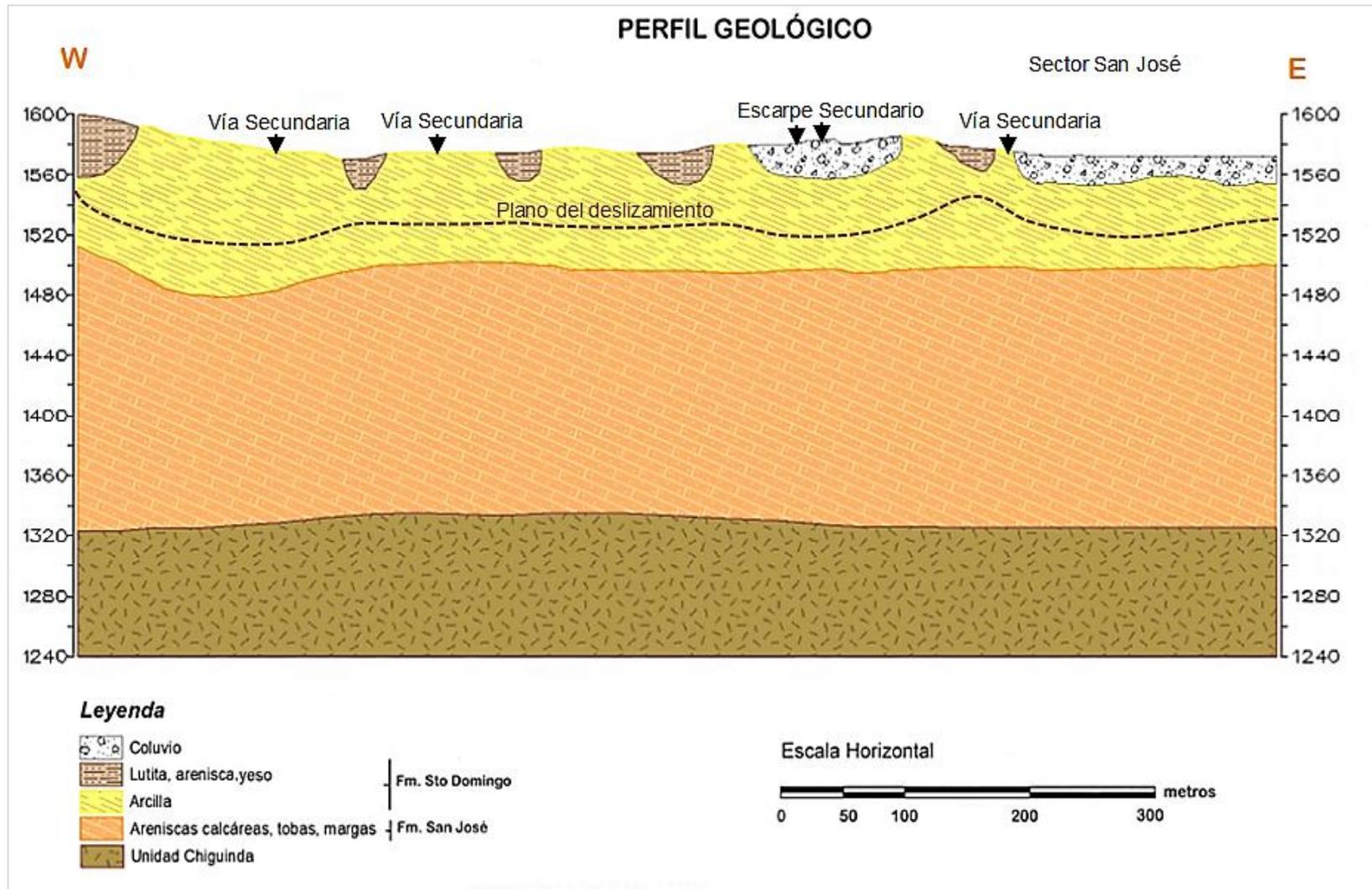


Figura 20. Correlación geológica del perfil C - C'.
Elaboración: La Autora.

4.5 Caracterización del Deslizamiento

El movimiento de ladera del sector San José se lo ha definido en zonas en función del estado de su actividad delimitando primero el área correspondiente a un antiguo deslizamiento el cual se extiende desde una altura de 1650 m.s.n.m hasta el borde del material aluvial del Rio Malacatos abarcando los poblados de San José y El Sauce. Su escarpe principal coincide con la zona levantada de la Fm. San José definiendo un movimiento rotacional en dirección Norte a Sur afectando una área de 849 245 m² con un volumen de 50 000 000 m³.

Con ensayos geofísicos se determinó las características de los perfiles del subsuelo, zonas saturadas, litología y tectonismo. Obteniendo como resultado mediante perfiles de micro gravimetría la potencia de las formaciones sedimentarias siendo entre 60 a 100 metros de para la Fm. Santo Domingo y 200 metros para la Fm. San José dentro del polígono.

En la figura 21 se ha definido nuevas áreas como movimientos que se han reactivado, al oeste del polígono de estudio se encuentra el deslizamiento DZ-1 con dimensiones que cubren 600 m de longitud, 460 m de ancho, una área de 266 832 m² y un volumen de 16 000 000 m³ con movimiento en dirección Norte a Sur. El deslizamiento DZ-2 limita una área de 175 917 m² con un volumen de 10 555 020 m³ con movimiento en dirección Norte a Sur. Existen deslizamientos de menor magnitud ubicados al Noroeste del polígono cuyas dimensiones para DZ-3 es de 100 m de longitud, 85 m de ancho, un área de 11 815 m² ocupando un volumen de 708 900 m³ con movimiento SW. Cerca a este se encuentra el deslizamiento DZ-4 con movimiento opuesto en dirección SE con 60 m de longitud, 33 metros de ancho con una área de 1847 m² y un volumen de 110 820 m³. El área total de la masa reactivada es de 456 411 m² con un volumen de 27 374 740 m³.

Al movimiento en conjunto se lo ha caracterizado como un deslizamiento rotacional reactivado de carácter múltiple mostrando repetidos movimientos del mismo tipo distribuidos en la misma área. Los principales factores condicionantes se atribuyen a la litología del sector formado por arcillas y al relieve predominando pendientes comprendidas entre 12 – 25%. A partir del estudio de ERT se determinó que el principal factor detonante es el agua la cual proviene de los sistemas de riego, canales de agua, captaciones, zangas, desagües, lluvias, fugas y actividades agrícolas, facilitando la infiltración y saturación del suelo provocando la reactivación del movimiento de ladera. Otro factor son las excavaciones o cortes para la construcción de viviendas, vías y la erosión que alteran la topografía original del terreno. A partir de los perfiles de gravimetría se determinó una falla de carácter inverso cual se relaciona con la deformación producida en el terreno.

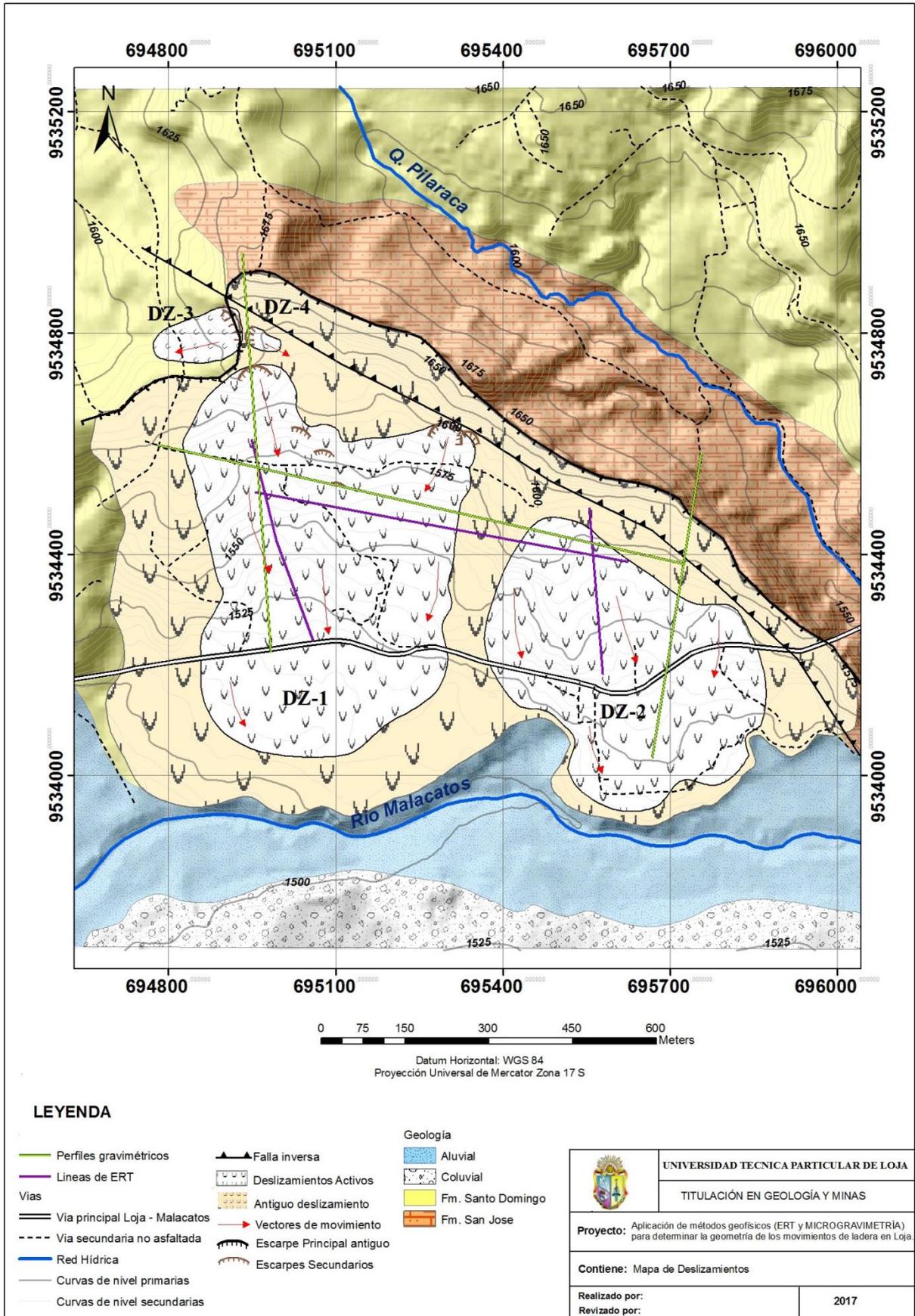


Figura 21. Mapa de ubicación de los deslizamientos.
Elaboración: La Autora.

4.6 Discusión de Resultados

Analizando el levantamiento geológico de campo se evidencia en la parte norte y sur la presencia de la Formación Santo Domingo compuesta por arcillas, lutitas, areniscas, vetillas de yeso, cubierta de manera superficial por azufre con la presencia de micropliegues; la Formación San José presente al centro del polígono está compuesta por tobas, areniscas calcáreas y margas con un buzamiento de estratos entre 43° a 55° . Al NE del polígono se distingue material coluvial depositado en zonas de menor pendiente sobre la Formación Santo Domingo y finalmente material aluvial a lo largo del Río Malacatos. Esto concuerda con la geología descrita por Hungerbühler et al. (2002) y Medina (2014). Sin embargo, dentro del marco geo-tectónico no concuerda con el tipo de falla establecido como normal, puesto que la falla modelada en los perfiles gravimétricos A-A' y B-B' corresponde a una falla inversa con dirección NW-SE con un buzamiento al NE la cual genera el levantamiento de la secuencia sedimentaria de la Formación San José en la vía principal Loja - Malacatos, como lo describe Solís (2015) en su modelo tectónico (Figura 23) que representa las fallas de segmentación intracuenca y borde de cuenca donde la prolongación de la falla el Tambo recibe el nombre de falla Picota. Realizado con aplicación de cálculos estadísticos y proyección estereográfica, determinando planos estructurales representativos con un rumbo de $N7^\circ W$ con un buzamiento de $41^\circ NE$ para el bloque noroccidental y un rumbo de $N49^\circ W$ con un buzamiento de $37^\circ NE$ para el bloque La Granja (Figura 22). Indicando dos disposiciones geométricas marcadas: una hacia el E y otra al NE.

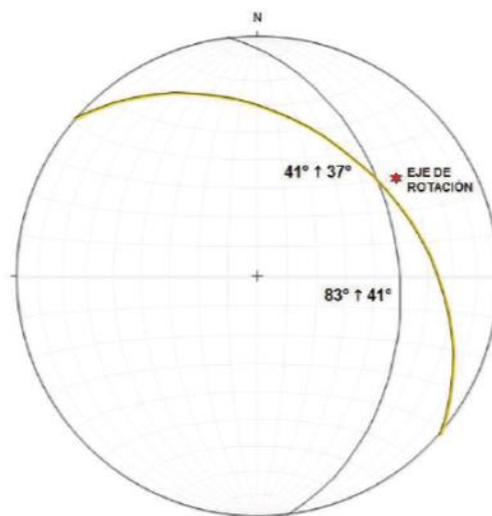


Figura 22. Proyección estereográfica del bloque noroccidental ($41^\circ/37^\circ$) y la granja ($83^\circ/41^\circ$).
Fuente: Solís, 2015.

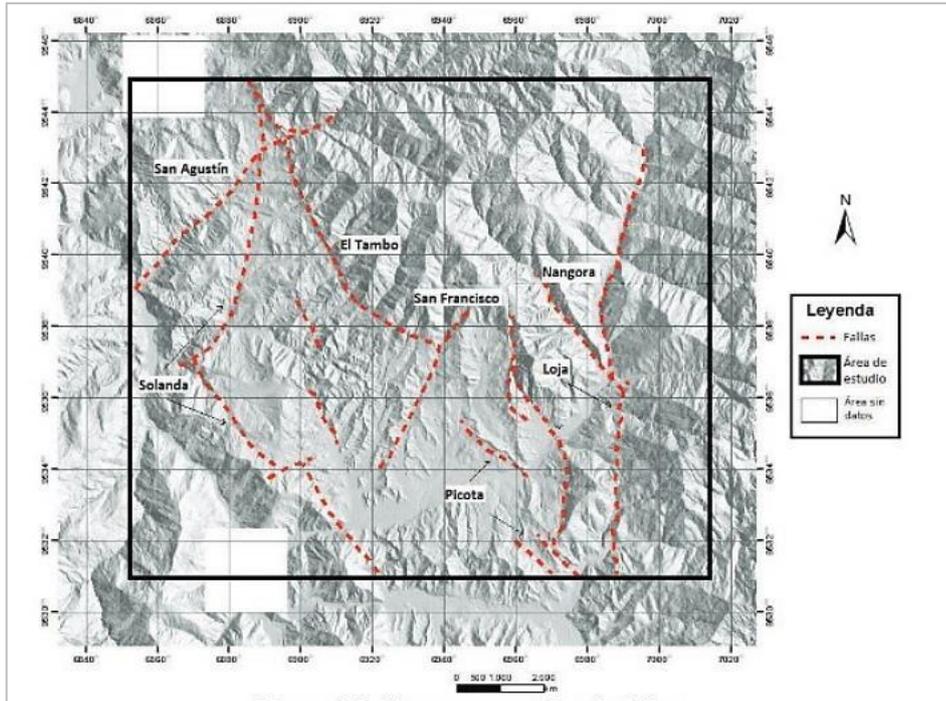


Figura 23. Mapa esquemático de fallas intracuenca y de borde de la parroquia de Malacatos. Fuente: Solís, 2015.

De los perfiles gravimétricos analizados se reveló una anomalía residual mínima de - 0.9 mgal en el perfil A, - 2.00 mgal en el perfil B, y - 0.2 mgal en el perfil C. Se modeló la anomalía observada con polígonos basados en densidades tomadas con muestras por el método del picnómetro siendo para la secuencia de arcilla 2,15 gr/cm³, para los depósitos de lutita con arenisca y yeso 2,2 gr/cm³, para las rocas de la Formación San José un promedio de 2,6 gr/cm³, material coluvial proveniente de la Formación San José (tobas, areniscas calcáreas) una densidad de 2,45 a 2,5 gr/cm³ y una densidad teórica de 2,67 gr/cm³ para el basamento metamórfico, determinándose una potencia entre 60 – 100 metros de profundidad en el área de estudio para la Formación Santo Domingo y 200 metros para la Formación San José, las cuales en base a la geología buzaban al NE. De esta manera la respuesta gravimétrica obtenida guarda relación con la geología de campo realizada.

Del resultado obtenido en base a líneas de tomografía de resistividad eléctrica con la configuración Dipolo – Dipolo se ha determinado la profundidad del material afectado por el movimiento de ladera definiendo zonas de arcilla saturada hasta 60 metros de potencia, resultado que se asemeja con el estudio realizado por Morocho (2015), quien aplicó líneas de ERT bajo la configuración Wenner – Slumberguer determinando zonas saturadas con potencias aproximadas de 50 metros.

CONCLUSIONES

- Geológicamente el área de estudio corresponde en su mayoría a la formación Santo Domingo de edad miocénica compuesta por arcilla, lutitas con intercalaciones de arenisca, vetillas de yeso y laminaciones cristalizadas de azufre buzando al NE; y en menor presencia la Formación San José, con buzamiento entre 43° a 55° al NE compuesta por margas, areniscas calcáreas, tobas cubiertas superficialmente por material calcáreo; además, se distingue depósitos superficiales: coluviales y aluviales.
- Correlacionando las líneas de tomografía de resistividad eléctrica y la gravimetría se infiere una profundidad del plano de deslizamiento de aproximadamente 60 m el material desplazado que está constituido por arcillas saturadas.
- El movimiento de ladera del poblado San José corresponde a un antiguo deslizamiento donde su escarpe concuerda con la zona levantada de la Formación San José, ocupando un área de 849 245 m² con un volumen de 50 000 000 m³ y clasificado como deslizamiento rotacional. Inmerso en este se han reactivado nuevos deslizamientos que le dan una tipología de múltiple (enjambre) rotacionales, que ocupan un área de 456 411 m² con un volumen de 27 374 740 m³.
- Al generar modelos de las respuestas gravimétricas en base a la geología, densidad y a su vez correlacionando resultados de perfiles geo eléctricos se ha determinado el comportamiento de las diferentes estructuras a profundidad revelando una anomalía residual mínima de - 0.9 mgal en el perfil A, - 2.00 mgal en el perfil B y - 0.2 mgal en el perfil C; usando densidades de 2,15 y 2,2 gr/cm³ para las rocas de Santo Domingo; 2,6 gr/cm³ para la Formación San José; 2,4 y 2,5 gr/cm³ para el material coluvial proveniente de la Formación San José y una densidad teórica de 2,67 gr/cm³ para el basamento metamórfico, con lo cual se define la geometría del movimiento de ladera:

Como resultado de los perfiles gravimétricos se determinó una falla inversa con dirección NW-SE con buzamiento NE, la cual genera el levantamiento de la secuencia sedimentaria de la Formación San José en la vía principal Loja – Malacatos denominada “Falla Picota” como una prolongación de la falla inversa el Tambo.

La potencia de las secuencias sedimentarias a partir de los perfiles gravimétricos para el área de estudio son de 60 a 100 m para la Formación Santo Domingo y 200 m para la Formación San José.

- A partir del ensayo de Tomografía de Resistividad Eléctrica, se determinó los valores de resistividad del suelo los cuales para la línea A-A' se encuentran en el rango de 0,355 Ω .m a 206 Ω .m, para la línea B-B' 0,417 Ω .m a 181 Ω .m y finalmente para la línea C-C' 0,618 Ω .m a 165 Ω .m.
- Los principales factores condicionantes se atribuyen a la litología y relieve del sector. El principal factor detonante es el agua que proviene de los sistemas de riego, canales de agua, captaciones, zangas, desagües, lluvias, fugas y actividades agrícolas facilitando la infiltración y modificación de la humedad del suelo provocando la reactivación del movimiento, sumado a ello los cortes en la ladera con fines de construcción y vías.
- Tanto los perfiles de ERT y micro-gravimetría muestran resultados similares y a la vez complementarios validando la utilidad de la combinación de técnicas geofísicas para la caracterización de deslizamientos planteando nuevas líneas de investigación.

RECOMENDACIONES

- Se considera factible aplicar un sistema de monitoreo en las zonas que se encuentran reactivadas para determinar la velocidad con la cual se desplaza.
- Realizar drenes superficiales para prevenir la erosión e infiltración del agua además del mejoramiento de los desagües reduciendo la inestabilidad del terreno.
- La zona afectada por el movimiento no debe ser urbanizada, el GAD parroquial debe prohibir la construcción de viviendas en toda el área.
- Destinar el área susceptible como un área verde mediante la cobertura vegetal de arbustos que permitan reducir el contenido de agua, siendo una alternativa ambiental excelente y económica de disminuir pérdidas por deslizamiento.
- Sin embargo para que las medidas de mitigación funcionen se requiere una mayor conciencia por parte de la ciudadanía sobre la amenaza que representa estos movimientos para su seguridad y que deben ser tomadas en cuenta en el momento de destinar el uso del suelo.

BIBLIOGRAFIA

- ABEM. (2009). Instruction Manual. Terrameter SAS 4000 / SAS 1000.
- Cantos Figuerola, J. (1987). *Tratado de Geofísica Aplicada* (3ra ed.). Madrid: Sección de Publicaciones de la E.T.S. de Ingenieros de Minas.
- Égüez, A., Alvarado, A., & Yepes, H. (2003). *Mapa de Fallas Activas y Pliegues Cuaternarios de Ecuador y Regiones Oceánicas adyacentes*.
- Elizalde, S. F. (2015). *Levantamiento de datos gravimétricos en las formaciones sedimentarias de la cuenca de Malacatos (Tesis de Pregrado)*. Loja, Ecuador: UTPL.
- GAD de Malacatos. (2012). *PLAN DE DESARROLLO Y ORDENAMIENTO TERRITORIAL DE LA PARROQUIA MALACATOS DEL CANTON LOJA*. Malacatos.
- Gallastegui, J. (2000). *Trabajos de Geología*. España: Universidad de Oviedo .
- GEOCOM. (s.f.). *Configuración Estilos de Levantamiento. Trimble Survey Controller*. Obtenido de <http://www.geocom.cl/assets/Configuracion-Trimble-Survey-Controller-GEOCOM.pdf>
- González de Vallejo, L. (2004). *Ingeniería Geológica*. Madrid, ORYMU,S.A, España.
- Hidroingeniería S.A.S. (s.f.). *Métodos de Prospección Geofísica (ABEM)*.
- Highland, L., & Bobrowsky, P. (2008). *Manual de derrumbes: Una guía para entender todo sobre los derrumbes*. Reston, Virginia: Servicio Geológico de los EE.UU.
- Hungerbuhler, D., Steinmann, M., Winkler, W., Seward, D., Eguez, A., Peterson, D., Hammer, C. (2002). Neogene stratigraphy and Andean geodynamics of southern Ecuador. *Earth Science Reviews*, 75 - 124.
- Kennerley, J. (1973). *Geology of Loja Province, southern Ecuador*. London: Institute of Geological Science (Overseas Division). Unppublisher Report 23, 34 pp.
- Kennerley, JB., Almeida, L., 1975 Mapa Geológico del Ecuador, hoja de Loja (56), escala 1:100.000. Instituto Geográfico Militar (IGM), Ministerio de Recursos Naturales y Energéticos (MRNE), Dirección General de Geología y Minas (DGGM), and Institute of Geological Sciences London (IGS).
- Loke, M. (February de 2000). Electrical surveys for environmental and engineering studies.Tutorial: 2-D and 3-D Electrical Imaging Surveys.
- Martinez, F., Pedrera, A., Ruano, P., Galindo, J., Martos, S., González, L., Marín, C. (2013). Combined microgravity, electrical resistivity tomography and induced polarization to detect deeply buried caves: Algaidilla cave (Southern Spain). *Engineering Geology*, 162, 67-78. Obtenido de <http://dx.doi.org/10.1016/j.enggeo.2013.05.008>
- Medina Toledo, J. L. (2014). *Validación geológica estructural de la cuenca sediementaria de Malacatos. (Tesis de pregrado)*. Loja: UTPL.

- Milsom, J. (2003). *Resistivity Methods. Field Geophysics*. Chichester: Wiley Ltda.
- Mironov, V. (1977). *Curso de Prospección Gravimétrica*. Barcelona, España: Reverté, S.A.
- Morocho, C. A. (2014). *Caracterización del deslizamiento de Malacatos mediante la aplicación de métodos de potenciales eléctricos (Tesis de pregrado)*. Loja: UTPL.
- Parasnis, D. (1970). *Principios de Geofísica Aplicada*. Madrid: Paraninfo.
- Porres, B. J. (2003). *Caracterización de cavidades en el subsuelo mediante la interpretación de perfiles de tomografía eléctrica. (Tesis Doctoral)*. España: Universidad de Burgos.
- Reyes, M. (2006). *Geofísica - Gravimetría*. Santiago de Chile: Departamento de Física - Usach.
- Scintrex. (2006). *Scintrex Autograv System. OPERATION MANUAL*. Canadá.
- Solís, B. E. (2015). *SEDIMENTOLOGÍA Y ESTRATIGRAFÍA DEL NORTE DE LA CUENCA DE MALACATOS - VILCABAMBA (MIOCENO, PROVINCIA DE LOJA - SUR DE ECUADOR)*. (Tesis de Pregrado). Quito, Ecuador: Escuela Politécnica Nacional.
- Suárez, J. (1998). *Deslizamientos y Estabilidad de Taludes en Zonas Tropicales*. (I. d. Ltda., Ed.) Bucaramanga, Colombia: Publicaciones UIS.
- Tamay, J., Galindo - Zaldívar, J., Ruano, P., Soto, J., Lamas, F., & Azañón, J. M. (2016). New insight on the recent tectonic evolution and uplift of the southern Ecuadorian Andes from gravity and structural analysis of the Neogene - Quaternary intramontane basins. *Journal of South American Earth Sciences*, 340 - 352.
- Tamay, J., Galindo, J., Ruano, P., Soto, J., Lamas, F., & Azañón, J. (2015). *Estructura de las cuencas sedimentarias neógenas-cuaternarias del Sur de Ecuador mediante datos de gravimetría: implicaciones en la evolución tectónica de los Andes*. Granada: XIV Reunión Nacional de Cuaternario.

ANEXOS

ANEXO: Densidades obtenidas por el método del picnómetro.

Formación Santo Domingo

| M₁ | P1 (Pv) | P2 (P+ M) | P3 (P+ A) | P4 (P+M+A) | |
|----------------------|----------------|------------------|------------------|-------------------|--------|
| Ensayo 1 | 9,24 | 10,51 | 15,76 | 16,41 | 2,0484 |
| Ensayo 2 | 9,24 | 10,5 | 15,76 | 16,44 | 2,1724 |
| Ensayo 3 | 9,24 | 10,51 | 15,76 | 16,46 | 2,2281 |

Prom: 2,15

| M_{2.1} | P1 (Pv) | P2 (P+ M) | P3 (P+ A) | P4 (P+M+A) | |
|------------------------|----------------|------------------|------------------|-------------------|--------|
| Ensayo 1 | 6,73 | 7,09 | 8,69 | 8,87 | 2,0000 |
| Ensayo 2 | 6,73 | 7,09 | 8,69 | 8,87 | 2,0000 |
| Ensayo 3 | 6,73 | 7,1 | 8,69 | 8,88 | 2,0556 |

Prom: 2,02

| M_{2.2} | P1 (Pv) | P2 (P+ M) | P3 (P+ A) | P4 (P+M+A) | |
|------------------------|----------------|------------------|------------------|-------------------|--------|
| Ensayo 1 | 6,73 | 7,12 | 8,69 | 8,89 | 2,0526 |
| Ensayo 2 | 6,73 | 7,13 | 8,69 | 8,9 | 2,1053 |
| Ensayo 3 | 6,73 | 7,13 | 8,69 | 8,9 | 2,1053 |

Prom: 2,09

Formación San José

| M_{3.1} | P1 (Pv) | P2 (P+ M) | P3 (P+ A) | P4 (P+M+A) | |
|------------------------|----------------|------------------|------------------|-------------------|--------|
| Ensayo 1 | 6,73 | 7,26 | 8,69 | 9,02 | 2,6500 |
| Ensayo 2 | 6,73 | 7,24 | 8,7 | 9,01 | 2,5500 |
| Ensayo 3 | 6,73 | 7,26 | 8,69 | 9,01 | 2,5238 |

Prom: 2,57

| M_{3.2} | P1 (Pv) | P2 (P+ M) | P3 (P+ A) | P4 (P+M+A) | |
|------------------------|----------------|------------------|------------------|-------------------|--------|
| Ensayo 1 | 6,73 | 7,22 | 8,69 | 9,01 | 2,8824 |
| Ensayo 2 | 6,73 | 7,21 | 8,69 | 9 | 2,8235 |
| Ensayo 3 | 6,73 | 7,2 | 8,69 | 9 | 2,9375 |

Prom: 2,88

| M_{3.3} | P1 (Pv) | P2 (P+ M) | P3 (P+ A) | P4 (P+M+A) | |
|------------------------|----------------|------------------|------------------|-------------------|--------|
| Ensayo 1 | 6,73 | 7,19 | 8,69 | 8,98 | 2,7059 |
| Ensayo 2 | 6,73 | 7,21 | 8,69 | 8,99 | 2,6667 |
| Ensayo 3 | 6,73 | 7,19 | 8,69 | 8,97 | 2,5556 |

Prom: 2,64

| M_{3.4} | P1 (Pv) | P2 (P+ M) | P3 (P+ A) | P4 (P+M+A) | |
|------------------------|----------------|------------------|------------------|-------------------|--------|
| Ensayo 1 | 13,82 | 14,95 | 23,77 | 24,46 | 2,5682 |
| Ensayo 2 | 13,82 | 14,98 | 23,77 | 24,48 | 2,5778 |
| Ensayo 3 | 13,82 | 15,14 | 23,77 | 24,58 | 2,5882 |

Prom: 2,58